

**ISTOM****Ecole supérieure d'Agro-Développement International**

32, Boulevard du Port F.-95094 - Cergy-Pontoise Cedex
tél : 01.30.75.62.60 télécopie : 01.30.75.62.61 istom@istom.net

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**Estimer les rendements des systèmes végétaux :****Contribution à la mise au point d'une méthodologie au
Vanouatou (Vanuatu)**

Parcelle de taros (Jung, 2012)

SOUTENU EN OCTOBRE 2012

* Apparaissant sur la convention

Nom et Prénom de l'étudiant(e) : Jung Mathilde
Promotion 98
Domaine d'approfondissement : Industrie agro-alimentaire
au Sud – Institut des régions chaudes – Montpellier SupAgro

Stage effectué au CTRAV, Vanuatu
du 04/04/2012 au 30/09/2012
Au sein de : IRD

Maître de stage : Laurence Pascal
Tuteur dans l'organisme d'accueil : Vincent Lebot

Résumé

Les systèmes agricoles à base de culture à multiplication végétative sont largement répandus dans les pays tropicaux. Cependant il y a peu d'informations disponibles sur ce type de système, notamment au Vanouatou, un archipel du Pacifique Sud. Ce travail propose d'étudier ces systèmes selon une approche agronomique. Pour cela les rendements sont élaborés à partir d'une nouvelle méthodologie, basée sur un inventaire des espèces de racines et tubercules et d'analyses de sols. Cette méthodologie a été testée sur un réseau de 224 parcelles réparties dans 6 villages sur 6 îles. Les résultats montrent une faible variabilité de la composition des sols intra-village, qui contraste avec une forte variabilité inter-village. Les rendements des systèmes varient du simple au triple selon les villages. Les rendements des parcelles ont tendance à diminuer au cours du cycle cultural, indépendamment de la composition chimique des sols. D'autres facteurs, tels que la proximité des parcelles par rapport au village, où les revenus engendrés par les ménages influencent les rendements des parcelles et des systèmes.

Mots clés : Vanouatou (Vanuatu), agriculture sur brûlis, racines, tubercules, rendements, sol, méthodologie.

Abstract

Agricultural systems based on vegetative propagation are dominant in tropical countries. However, research based knowledge and insights about these systems are lacking, notably for Vanuatu, a volcanic archipelago in the South Pacific. This work attempts to study these systems by using a new methodology based on a detailed inventory of roots and tubers carried out in 224 plots across six villages. The results show low variability of soil composition between villages, which contrasts with high variability between plots from the same village. Yields systems vary between villages and decreased during the crop cycle, regardless of the chemical composition of the soil. Others factors such as the proximity of the plots to villages and the overall household income also influence the yield of the plots and systems.

Key words : Vanuatu, swidden cultivation, roots, tubers, yields, soil, methodology.

Resumen

Los sistemas agrícolas basados en plantas que se propagan vegetativamente son comunes en los países tropicales. Sin embargo no hay mucha información disponible sobre este tipo de sistema, incluyendo en Vanuatu, un archipiélago en el Pacífico Sur. Este trabajo propone estudiar estos sistemas en un ángulo agrícola. Con este objetivo, los rendimientos se han extraídos con una nueva metodología, basada en un inventario de las raíces y tubérculos. Esta metodología se ha probado en una red de 224 parcelas en seis aldeas. Los resultados muestran una baja variabilidad de la composición del suelo dentro de la aldea, lo que contrasta con un pueblo de alta variabilidad interindividual. Los rendimientos de los sistemas varían de uno a tres, dependiendo de la aldea, pero los rendimientos de las parcelas disminuyeron durante el ciclo del cultivo, independientemente de la composición química del suelo. Otros factores, tales como trazos de proximidad de la aldea, o los ingresos generados por los hogares influyen en las parcelas de rendimiento y sistemas.

Palabras clave: Vanuatu, agricultura de tala y quema, raíces, tubérculos, rendimientos, suelos, metodología.

Table des matières

Résumé.....	2
Table des matières.....	3
Table des illustrations	6
Liste des abréviations.....	8
Remerciements.....	9
Introduction.....	11
Systèmes végécoles et sécurité alimentaire.....	11
Le projet « Végé-culture »	11
Objectifs du stage	12
1. Outils et approche méthodologique	13
1.1. Systèmes végécoles : définitions.....	13
1.2. Les racines et tubercules	13
1.3. Comment mesurer la durabilité agronomique des systèmes végécoles ?	14
1.3.1. Premier indicateur : la composition chimique des sols	14
1.3.2. Deuxième indicateur : les rendements	15
1.4. Le Vanouatou	16
1.4.1. Le milieu physique	16
1.4.2. Histoire	16
1.4.3. Contexte socio-économique.....	17
1.4.4. L'agriculture vivrière	18
1.5. Contraintes à l'estimation du rendement.....	19
1.6. Synthèse bibliographique des méthodologies	20
1.7. Nouvelle méthodologie et nouveaux outils	21
1.8. Cadres et hypothèses de travail	251
2. Matériels et méthodes	24
2.1. Echantillonnage	24
2.1.1. Sélection des îles et des villages	24
2.1.2. Sélection des ménages.....	24
2.1.3. Sélection des parcelles.....	24
2.1.4. Sélection des plantes	25
2.1.5. Prélèvement des sols	26

2.2.	Déroulement des observations et des enquêtes	26
2.3.	Elaboration du rendement.....	26
2.3.1.	Mesure de la surface.....	26
2.3.2.	Inventaire des espèces.....	27
2.3.3.	Calcul du rendement de matière fraîche d'une parcelle	27
2.3.4.	Calcul du rendement de matière fraîche par système.....	27
2.3.5.	Production de matière sèche	28
2.3.6.	Calcul de la teneur en macro éléments	28
2.4.	Traitement des données	28
3.	Résultats	29
3.1.	Les principales caractéristiques des systèmes végétaux et leurs interactions	29
3.1.1.	Répartition des données	29
3.1.2.	La taille des parcelles	30
3.1.3.	L'âge des parcelles	30
3.1.4.	La composition chimique des sols	31
3.1.5.	La durée de jachère	32
3.1.6.	Les revenus des producteurs.....	33
3.2.	Variabilité inter-sites	34
3.2.1.	A chaque village sa performance.....	34
3.2.2.	Des conditions spécifiques à chaque village	35
3.2.3.	Pression anthropique et rendements	38
3.2.4.	Les revenus : cause d'abandon des parcelles ?	39
3.2.5.	La densité de plantes dans les parcelles	39
3.2.6.	La culture de tête d'assolement	39
3.3.	Variabilité intra-sites	40
3.3.1.	Des rendements décroissants au cours du temps	40
3.3.2.	Evolution de la densité de plantes dans les parcelles au cours du temps	40
3.3.3.	Evolution de la composition chimique des sols au cours du temps	41
3.3.4.	Les rendements à travers leurs contraintes	42
3.5.	Valeurs nutritionnelles	42
3.5.1.	Comparaison entre les tubercules et les céréales.....	42
3.5.2.	Rendement en macro-éléments des systèmes végétaux	42
3.5.3.	Apports caloriques.....	43
4.	Discussion	44

4.1.	Variables structurelles	44
4.2.	Caractérisation chimique des terres analysées (0-20 cm)	44
4.3.	Historique des parcelles et évolution des sols	45
4.4.	Une relative stabilité chimique des sols	46
4.5.	Les rendements	47
4.6.	Ce qui influence les rendements	47
4.7.	Cultures de rentes et cultures de subsistance	49
4.8.	Aspects nutritionnels	50
4.9.	Limites de la méthode	51
4.10.	Possibilités d'amélioration	52
Conclusion		53
Bibliographie		54
Annexes		60

Table des illustrations

Figure 1. Comparaison des exportations en minéraux des principales céréales et des racines et tubercules.....	13
Figure 2. Entrées et sorties d'éléments minéraux dans les agroécosystèmes cultivés	15
Figure 3. Carte du Vanouatou.	16
Figure 5. Eli, agriculteur, devant sa nouvelle parcelle de patates douces tout juste défrichée.....	17
Figure 4. Augmentation des importations de produits agricoles et de denrées alimentaires.....	17
Figure 6. Schéma des systèmes de cultures mis en place par un ménage.....	18
Figure 7. Variabilité morphologique entre différentes espèces d'ignames.	19
Figure 8. Variabilité morphologique entre différentes variétés de taros.	19
Figure 9. Proximité des jardins de Lamlou, sur l'île de Tanna.	24
Figure 10. Approche diachronique	25
Figure 11. Surfaces de bonnes terres disponibles par foyer	29
Figure 12. Taille des jardins et surface de bonnes terres.....	30
Figure 13. Age des parcelles en fonction de la superficie de bonnes terres disponibles.	31
Figure 14. Plan des parcelles dans les deux composantes de l'ACP1.	31
Figure 15. Durées moyennes de jachères en fonction de la surface disponible par foyer.	32
Figure 16. Quantité de minéraux en fonction de la durée de jachère.....	33
Figure 17. Superficie de bonnes terres disponibles et les revenus annuels des ménages	33
Figure 18. Relation entre les revenus agricoles et les durées de jachères	34
Figure 19. Plan des parcelles dans les deux composantes de l'ACP2	34
Figure 20. Les rendements moyens des systèmes par village.....	34
Figure 21. Plan des parcelles dans les deux composantes de l'ACP3	35
Figure 22. Composition en nutriments des sols des différents villages	36
Figure 23. Plan des parcelles dans les deux composantes de l'ACP4	37
Figure 24. Moyenne des rendements des systèmes par village	38
Figure 25. Corrélation entre le rendement et la durée de jachère	38
Figure 26. Corrélation entre les rendements moyens et les revenus moyens par ménages.....	39
Figure 27. Densité moyenne des plantes par village	39
Figure 28. Plan des parcelles dans les deux composantes de l'ACP5	39
Figure 29. La dynamique des rendements moyens par parcelle	40
Figure 30. Moyennes de la densité sur les parcelles de chaque village	40
Figure 31. Moyenne des densités sur les parcelles tous villages confondus	40
Figure 32. Quantité de matière organique dans le sol en fonction du temps	41
Figure 33. Evolutions des teneurs des six minéraux principaux dans les sols d'Avounaleleo	41
Figure 34. ACP6 : représentation des variables dans le cercle des corrélations	42
Figure 35. ACP7 : représentation des variables dans le cercle des corrélations	42
Figure 36. Comparaison des teneurs en macro-éléments entre les racines, tubercules et deux céréales	42
Figure 37. Comparaison entre les apports recommandés et les rendements moyens des systèmes en kJ par village	43
Figure 38. Rendement en macro-éléments des systèmes végétaux	43

Tableau 1. Hypothèses.....	23
Tableau 2. Description des six villages.....	24
Tableau 3. Conversion de l'âge des parcelles de mois en années.	25
Tableau 4. Répartition des parcelles par villages et par année de culture.	29
Tableau 5. Description de la taille des parcelles.....	30
Tableau 6. Moyenne des surfaces en fonction de la culture dominante.....	30
Tableau 7. Age des parcelles, statistiques descriptives..	30
Tableau 8. Age moyen des parcelles par village.....	31
Tableau 9. Matrice des corrélations entre la pression anthropique et la composition du sol.	31
Tableau 10. Matrice des corrélations entre le revenu et la pression anthropique, tous villages confondus.....	33
Tableau 11. Matrice des corrélations entre les sols et les durées de jachères.	33
Tableau 12. Rendements moyens par système dans chaque village.....	35
Tableau 13. Le pH moyen selon les villages.	36
Tableau 14. Composition moyenne en matière organique et en minéraux des sols par village.	36
Tableau 15. Matrice des corrélations, obtenue à partir de l'ensemble des données, et non pas des moyennes.....	37
Tableau 16. Tableau des revenus des agriculteurs et des rendements des systèmes	39
Tableau 17. Densité moyenne par village.	39
Tableau 18. Rendements moyens par village et par an.	40
Tableau 19. Table des groupes selon les rendements moyens des parcelles au cours du temps.	40
Tableau 20. Matrice des corrélations entre l'âge des parcelles et leur composition chimique.....	41
Tableau 21 Apport calorique des racines et tubercules frais.....	43
Tableau 22 Comparaison des rendements de macro-éléments des céréales et des racines et tubercules.....	43

Liste des abréviations

°C : degré Celsius

ACP : Analyse en composante principale

AFSSA : Agence française de sécurité sanitaire

ANR : Agence nationale de la recherche

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

BMCE : Banque marocaine du commerce extérieur

BT : bonnes terres

Ca: calcium

CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

Colocasia esculenta : taro

CTRAV : Centre de Techniques et de Recherches en Agriculture du Vanuatu

Dioscorea spp.: igname

FAO: Food and Agriculture Organization

GPS: Global Positioning System

Ipomoea batatas: patate douce

IDH : L'indice de développement

IRC : Institut des régions chaudes

IRD : Institut de recherche et développement

K: potassium

Ltd : Limited Liability (société à responsabilité limitée)

M²: mètre carré

Manihot esculenta: manioc

Mg: magnesium

mm : millimètre

N: azote

P: phosphore

pH KCl : correspond à la concentration en hydrogène [H⁺] du sol obtenu après ajout de KCl.

pH eau : le pH eau (potentiel hydrogène) correspond à la concentration en hydrogène [H⁺] de la solution du sol. Il est appelé ainsi car il est mesuré dans un mélange terre / eau.

PIB: Produit intérieur brut

PMA : Pays les moins avancés

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement.

S: silice

SPIR: Spectrométrie proche infrarouge

Xanthosoma sagittifolium: taro fidji ou macabo

Remerciements

Je tiens à remercier l'Agence nationale de la recherche (ANR), principal financeur du projet. Cette étude n'aurait pas été possible sans le cadre administratif que m'ont fourni l'IRD et l'Université de Montpellier 2.

Ce stage est l'aboutissement de cinq années d'études, et ce n'est pas sans une pointe de nostalgie que je remercie les deux écoles qui ont peuplé mon parcours. Merci à l'IRC, et particulièrement à Gaëlle BOSIO pour avoir trouvé un nouveau jury. Je tiens à remercier Stéphanie REGNAULT, qui a été bien souvent à l'autre bout du fil, à l'écoute de toutes mes péripéties. Un grand merci à mon tuteur, Sylvain HALFTERMEYER, pour son point de vue d'agronome extérieur au projet qui m'a été précieux.

De nombreuses personnes ont guidé mes pas d'agronome dans l'univers de la recherche.

Je remercie chaleureusement ma maîtresse de stage, Laurence PASCAL, pour son aide à Avounaleleo et Brenwé, ses conseils tout au long de mon stage et sa bonne humeur communicative, véritable moteur lors de crises d'allergies. J'ai également eu la chance d'avoir une co-encadrante géniale, j'ai nommé Stéphanie CARRIERE. Merci à son œil de lynx, à ses conversations palpitantes, et à la vision captivante qu'elle renvoie de son métier. Cela a été extrêmement enrichissant de travailler avec vous deux, et j'espère que l'on pourra renouveler cette expérience.

Sur place, j'ai d'abord été accueillie par le Cirad. Un immense merci à Vincent LEBOT. Votre disponibilité, malgré vos nombreux projets, n'a cessé de m'impressionner. Votre expérience et votre appui scientifique (et logistique) ont été importants pour moi. Cela a été un honneur d'être votre voisine de bureau pendant quelques mois et de pouvoir échanger avec vous. A Port-Vila, j'ai également eu la chance de croiser Laurence RAMON et Patricia SIMEONI. L'intérêt que vous portez à ce travail a été une réelle motivation, et nos discussions une grande source d'inspiration. Stéphanie, merci pour ces quelques semaines, qui se seraient transformées en mois si tu ne m'avais pas aidé à manier le spectromètre.

A Santo, j'ai trouvé un toit, et non des moindres. Un grand merci à toute l'équipe du CTRAV, à Marie MELTERAS, directrice souriante et à l'écoute, à Roger MALAPA et à Tari, spécialistes des racines et tubercules et des soirées kava, à Mauricette, qui est une crème de secrétaire, à Margot et El Frida, pour leurs discussions de couloirs. Marylin, pour toutes ces heures à couper des racines ensemble : merci. Franck Jimmy, Franck Maurice, Willy, Tony, je ne peux malheureusement pas citer tout le monde, mais sachez que je n'ai oublié personne.

Aucune ligne de ce rapport n'aurait pu être écrite sans les agriculteurs des six villages du projet, qui depuis quelques années voient défiler étudiants et chercheurs, et qui trouvent le temps et la patience de nous accueillir au sein de leur famille et de nous expliquer leurs vies.

Un grand merci à Julien BLANCO, pour le plus sympathique transfert de connaissances que je pouvais avoir sur R et le Vanouatou.

Andrej MERGEDUS, *da ne govorim o Francais, tako da imam samo eno stvar povedat: dajte plesne čevlje in kmalu tudi v Sloveniji !* Aparna MANI, *I'm not gonna speak hindi... Just to tell you, you both are so interesting people, and thank you TU MAS for conversations, debates, and fun.*

A Port-Vila, à Toulouse, à Montpellier, à Paris, de nombreuses personnes m'ont hébergées. Willy, Maude, Chantal, Chloé : merci beaucoup.

Mona, Clarou, Sou, Maryou, Clouny, et ma petite Marion, merci de la place délicieuse que vous me gardez dans votre vie, et que je savoure, même à l'autre bout du monde.

Enfin, merci à mes grands-parents pour leur apprentissage accéléré de Skype, à ma maman pour ses coups de fils improvisés (et toutes les coquilles qu'elle a éliminées), à mon papa pour ses projets qui m'ont tenu un pied en France. Merci d'être toujours présents, malgré mon absence.

Introduction

Systèmes végécoles et sécurité alimentaire

Les systèmes « végécoles » sont un type d'agriculture itinérante sur brûlis, produisant essentiellement des plantes à racines et tubercules tels que le manioc, la pomme de terre, la patate douce, l'igname et le taro, et dont le principal mode de reproduction est végétatif. Ces plantes contribuent ainsi à la sécurité alimentaire de nombreux pays en voie de développement en Afrique, en Asie, dans le Pacifique, en Amérique Latine et Caraïbes (FAO¹, 2002). Ces cultures produisent près de 5% des apports caloriques mondiaux (contre 48% pour les céréales). En Afrique, cet apport est de 14%. Alors qu'il y a environ un million de personnes sous-alimentées dans le monde (FAO, 2010), et que les prix des céréales sont instables, les racines et tubercules constituent des apports vivriers cruciaux.

Cependant l'intensification actuelle de ces systèmes laisse prévoir un raccourcissement des temps de jachères (Domas, 2003). Des jachères plus courtes entraînent un appauvrissement des sols, et une invasion des adventices (Johnson *et al.*, 1991). Si les rendements diminuent suite à ces évolutions, la question se pose alors de la durabilité de ces systèmes, en termes agronomiques.

Pourtant, l'agriculture itinérante est encore mal connue et souvent décrite comme improductive et dégradante pour l'environnement (Mertz, 2012). Cette réputation a évincé les aspects durables de ces systèmes. Pourtant ils paraissent plus efficaces que les systèmes d'agriculture sédentaire, en terme de lutte contre l'érosion, de déforestation et de stock de carbone (Bruun T. B. *et al.*, 2009).

Produire des statistiques objectives reste nécessaire pour orienter l'agriculture et les politiques publiques, afin d'améliorer la sécurité alimentaire.

Le projet « Végé-culture »

C'est dans ce contexte que le projet Végé-culture a été mis en place. Il vise à mieux comprendre les dynamiques liées à l'agriculture sur brûlis. L'étude se déroule au Vanouatou, archipel de plus de 80 îles où les systèmes végécoles sont les principales formes d'agriculture.

C'est un projet pluridisciplinaire articulé autour de cinq tâches, qui combinent des approches écologique, génétique, chimique, socio- économique, anthropologique et géographique. L'objectif est de créer de nouvelles méthodes visant à décrire les systèmes végécoles en général.

Le travail géographique de la tâche 1 a permis de cartographier l'archipel du Vanouatou en différents types d'environnements. L'objectif étant d'identifier les freins et les contraintes au développement de l'agriculture vivrière afin de connaître la superficie de bonnes terres disponibles par foyer. On connaît ainsi la pression anthropique exercée dans chaque village. La tâche 2 se déroule en deux temps. La tâche 2.1 a pour but de développer et tester des indices écologique pertinents pour comprendre les dynamiques spatio-temporelles de l'agrobiodiversité des systèmes végécoles sur les six îles du projet. (Blanco, 2011 ; Blanco *et al.*, soumis).

¹ FAO : Food and Agriculture Organization

Objectifs du stage

Dans la tâche 2.2, il s'agit de développer une nouvelle méthodologie pour estimer la durabilité agronomique des systèmes de cultures traditionnels à base de racines et tubercules.

Cette méthode se propose de quantifier les exportations des systèmes végétaux en termes de rendements en matière fraîche, pour ensuite obtenir les rendements en amidon et autres macro-éléments des tubercules. Les rendements obtenus sont ensuite mis en relation avec les systèmes de cultures mis en place et la composition chimique des sols au cours du cycle de culture.

Le protocole se doit d'être simple, rapide, et peu coûteux, à disposition des chercheurs du Sud. Afin de vérifier la fiabilité de la méthode, nous proposons à travers cette étude de tester et comparer sur un réseau de parcelles des indices permettant de quantifier les performances.

Le projet Végéculture a permis l'analyse chimique de 224 échantillons de sols du Vanouatou. Cette étude s'appuie également sur les inventaires des espèces cultivées sur ces mêmes parcelles, ainsi que leur surface de culture (Blanco, 2011) afin de modéliser le rendement en matière fraîche.

Dans le but de rendre cette méthode plus rapide et moins onéreuse, le projet développe la technique d'analyse chimique par spectrométrie proche infrarouge (SPIR). Deux modèles ont été développés, un pour les sols et un pour les racines et tubercules. Le modèle « racines et tubercules » a besoin d'être validé. Pour cela 270 matières sèches de plantes amylacées ont ainsi été réalisées, afin d'enregistrer leur spectres par la SPIR et 226 d'entre elles ont été envoyées pour analyses chimiques afin de comparer les résultats obtenus par la SPIR et par analyse chimiques. Malheureusement, les résultats des analyses chimiques n'étant toujours pas disponibles, les teneurs en macroéléments des racines et tubercules obtenues par la SPIR ne sont pas utilisable pour ce rapport. Les estimations des rendements en amidon et autres macroéléments ont dues être établies grâce à des références bibliographiques.

Dans une première partie nous évoquerons le contexte agricole du Vanouatou, ainsi qu'une synthèse bibliographique des méthodes qui existent déjà, de manière à aboutir au cadre et aux hypothèses de travail qui en découlent. Dans une deuxième partie nous décrirons la méthodologie. Ensuite les résultats obtenus et présentés en troisième partie permettent de valider la méthode et d'évaluer la durabilité des systèmes végétaux du Vanouatou à travers une discussion, qui sera la quatrième partie de ce rapport.

1. Outils et approche méthodologique

1.1. Systèmes végécoles : définitions

L'agriculture sur abattis-brûlis, autrement appelée agriculture itinérante sur brûlis, est largement pratiquée en zone tropicale humide. Ces termes regroupent une multitude de système de culture, mais Brookfield *et al.* (1995, cité par Mertz, 2002) reconnaissent que tous ont pour point commun de maintenir la fertilité par une période de jachère. Conklin (cité par Allen, 2001) propose en 1957 une définition qui les regroupe comme étant des systèmes dans lesquels les parcelles sont défrichées puis brûlées et mises en culture de manière discontinue (avec une période de jachère plus longue que la période de culture).

La végéculture est un cas particulier d'agriculture itinérante sur brûlis, car principalement basée sur la multiplication végétative de plantes à racines et tubercules et parfois à rejet comme le bananier (Sauer, 1969 ; Yo Shida *et al.*, 2002 cité par Morelli, 2003).

1.2. Les racines et tubercules

Ces plantes à multiplication végétative sont des racines et des tubercules. En zone tropicale humide on trouve surtout le taro (*Colocasia esculenta*) et le macabo (*Xanthosoma sagittifolium*), l'igname (*Dioscorea* spp.), la patate douce (*Ipomoea batatas*), et le manioc (*Manihot esculenta*).

Elles n'ont pas de période de croissance critique et donc résistent mieux à la sécheresse que les céréales (FAO, 2002). De plus ces cultures s'adaptent à de nombreux environnements, en fournissant des rendements raisonnables là où la plupart des céréales ne pourraient pas (Itharattana dans FAO, 2002).

Leur besoin en minéraux est beaucoup plus faible. Elles ponctionnent moins de nutriments des sols, mais la contrepartie est qu'elles contiennent moins de minéraux et de nutriments que les céréales (Figure 1).

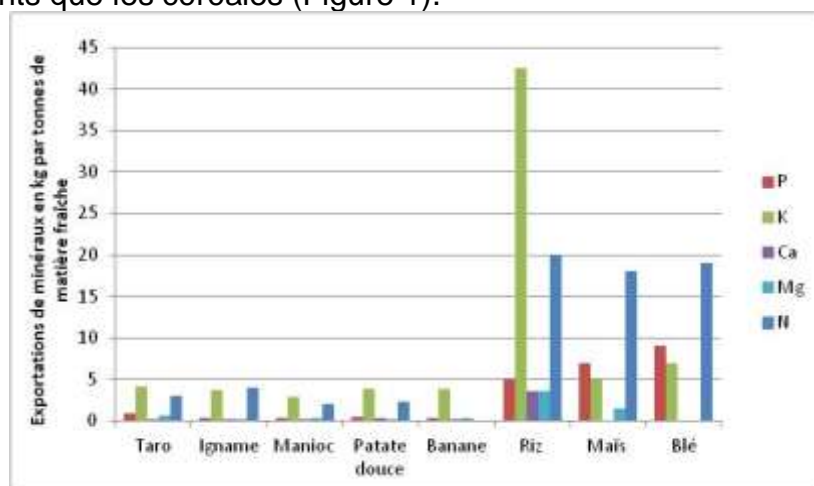


Figure 1. Comparaison des exportations en minéraux des principales céréales et des racines et tubercules.

Sources en Annexe 4.

Les valeurs tiennent compte des racines et tubercules et des grains uniquement. Les tiges et les feuilles ne sont pas incluses. Les teneurs en azote de la banane n'ont pas été trouvées. (P : phosphore, K : potassium, Ca : calcium, Mg : magnésium, N : azote)

Contrairement aux céréales, les racines et tubercules sont cultivés sans intrants.

Les racines et tubercules ont un calendrier flexible, ce qui permet d'étaler leur production sur l'année. De plus, une fois arrivée à maturité elles peuvent être

conservées sur pied pendant plusieurs mois.

Malgré les avantages qu'elles présentent, ces plantes ont souvent été étudiées dans leur d'expérimentations, et non dans leur contexte de production principal, à savoir les systèmes végécoles. La méconnaissance des performances agronomiques de ces systèmes, ainsi que de leur impact sur les sols pose la question de leur durabilité.

1.3. Comment mesurer la durabilité agronomique des systèmes végécoles ?

Les paramètres à contrôler lors de l'étude des systèmes végécoles sont nombreux. Mertz (2002) en dresse la liste (à savoir la surface des parcelles et leur production, les pratiques agricoles et en particulier les intrants utilisés, et les stratégies paysannes). En outre ces paramètres sont à mesurer sur un échantillon suffisamment important de parcelles.

Une étude dans des conditions expérimentales permettrait de limiter les biais et les incertitudes, mais cela ne reflètera jamais l'hétérogène réalité. L'étude de ces systèmes sur le terrain est une démarche plus pertinente mais autrement plus complexe.

Dans le souci de prioriser les paramètres à mesurer, nous allons nous appuyer sur la définition suivante. La durabilité des systèmes végécoles peut s'évaluer à partir de ces quatre piliers : productivité, stabilité, résilience et efficience (Huxley, 1999). Le terme résilience signifie la capacité à absorber des perturbations extérieures, afin d'atteindre une certaine stabilité. De même on ne saurait considérer un système comme efficient si les ressources de ce système ne sont pas utilisées, ou à l'inverse si elles sont surexploitées.

La composition chimique des sols et les rendements des systèmes paraissent deux indicateurs pertinents au regard de ces quatre piliers.

1.3.1. Premier indicateur : la composition chimique des sols

Tous les éléments présents dans les plantes ne proviennent pas du sol. En particulier dans le cas des racines et tubercules, constituée principalement d'amidon, donc de carbone provenant de l'air et capté grâce à la photosynthèse. La plante puise l'hydrogène et l'oxygène dans l'eau.

Les éléments nutritifs provenant du sol sont les minéraux. Ils sont classés selon les quantités présentes dans les plantes et leurs rôles dans leur croissance. L'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K) sont considérés comme majeurs. Le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et la silice (S) comme secondaires. Considérés comme indispensables en quantité importante pour la croissance des plantes, les rendements peuvent être limités par les quantités de minéraux disponibles. Les entrées sont difficiles à estimer. La composition chimique des sols est la résultante de nombreux flux (Figure 2).⁴

Ainsi plutôt que d'établir le bilan des entrées et des sorties, une analyse chimique du sol semble un indicateur plus simple à mesurer. L'étude du sol tout au long du cycle de culture permettra de voir l'effet éventuel des cultures sur les sols.

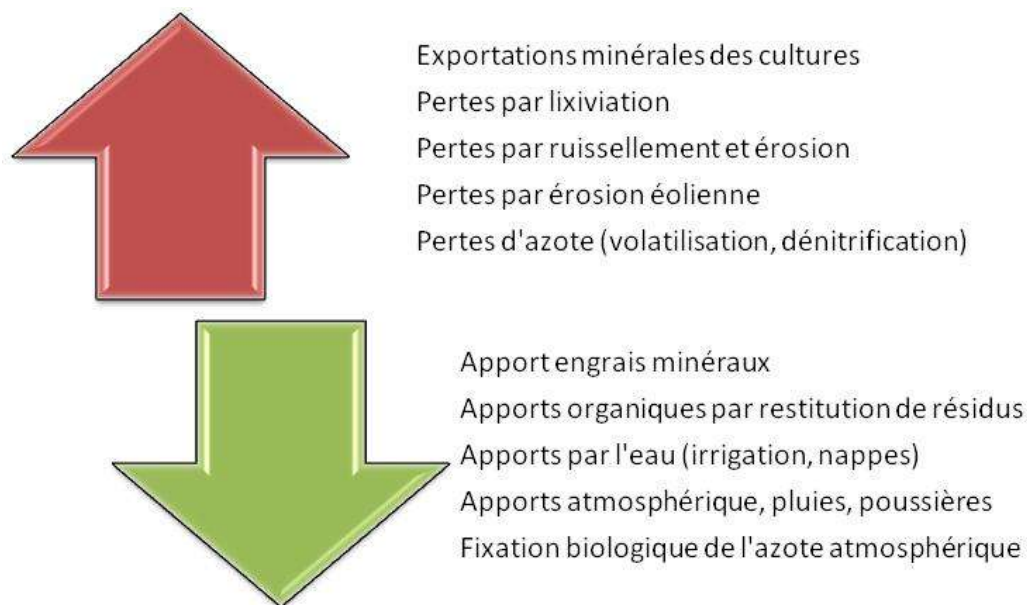


Figure 2. Entrées et sorties d'éléments minéraux dans les agroécosystèmes cultivés
D'après Bertrand et Gigou, 2000.

1.3.2. Deuxième indicateur : les rendements

Les pertes en éléments minéraux sont également nombreuses et complexes à calculer. Dans les parcelles des systèmes végétaux du Vanouatou, il y a des espèces pérennes et un recru important, qui participent à la protection du sol. (Rousselet, 2002). Ce couvert végétal brise les vents et ralentit la chute des gouttes d'eau. De même, le maintien des résidus de récolte sur la parcelle renforce la résistance des sols à l'érosion (Roose, 1993 ; Fotsing, 1993). De plus, les parcelles sont souvent de petites tailles et entourées d'arbres brise vent.

Comme il s'agit de sols sous cultures, les principales pertes (exportations) en minéraux se font par la récolte, qui représente la principale « sortie » du système. Pour connaître ces exportations, il faut d'abord connaître la quantité de matière fraîche transportée hors de la parcelle.

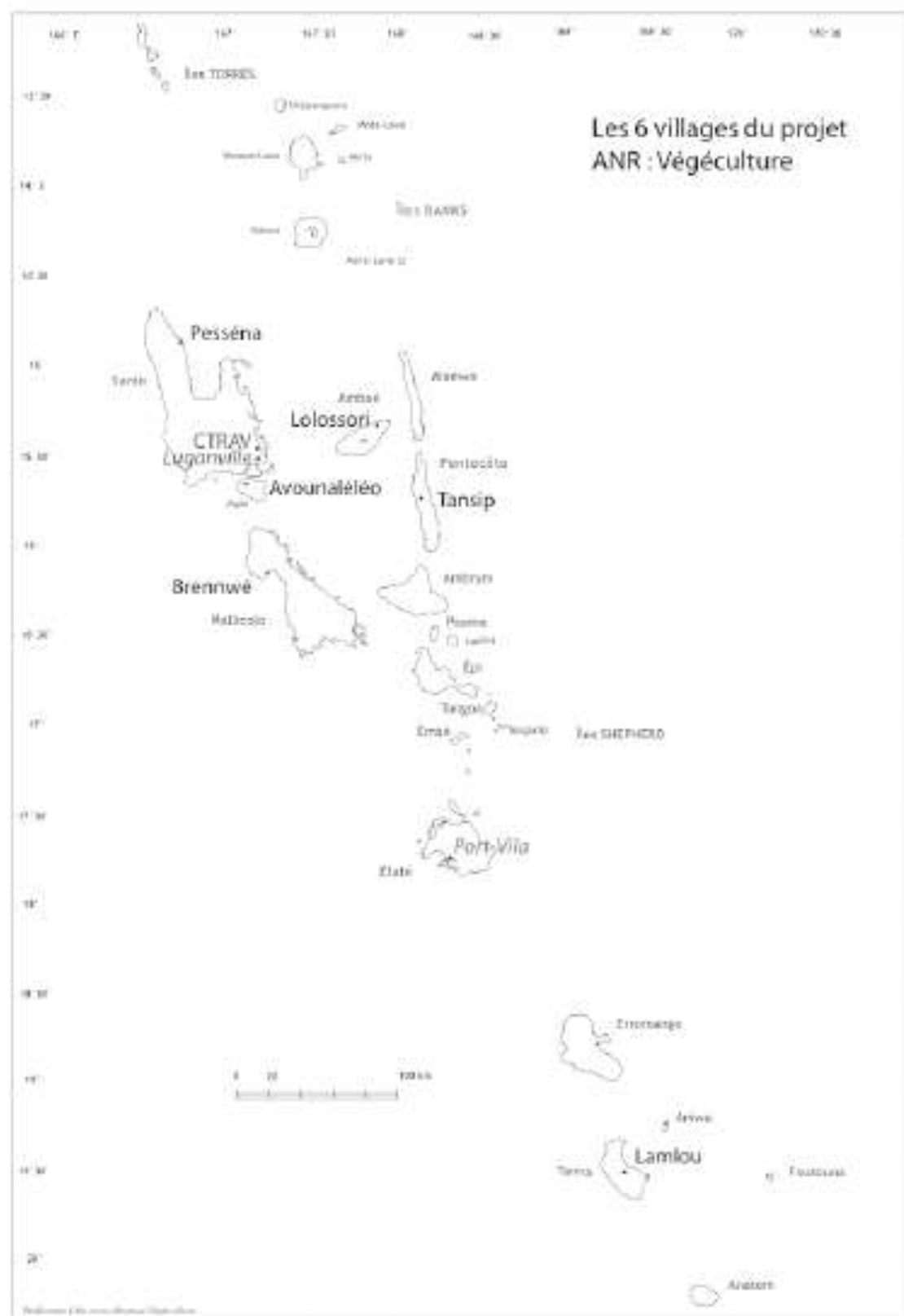


Figure 3. Carte du Vanouatou.
D'après Siméoni, Géoconsulte.

1.4. Le Vanouatou

1.4.1. Le milieu physique

Le Vanouatou est un archipel composé de 83 îles d'origine volcanique (Figure 3). La surface de terres totales est de 12 230 km² (Siméoni, 2012).

L'archipel d'origine volcanique a vu le jour au début de l'ère tertiaire. Plusieurs volcans sont encore en activité, tels que le Mont Yasour à Tanna, ou Benbow et Maroum sur l'île d'Ambrym. Les sols du Vanouatou sont diversifiés : roches éruptives, terrasses sédimentaires ou plateaux calcaires coralliens. On observe principalement des andosols, des sols fersialitiques et ferralitiques ou bien des sols humifères (Quantin, 1980). En général les sols du Vanouatou offrent un bon potentiel agricole. Quoique parfois hydro-morphes, ou inexploitable à cause du climat ou d'un relief trop prononcé, comme c'est le cas de 40% de la superficie de l'archipel (Siméoni, 2012). Néanmoins les sols cultivables ne sont pas toujours accessibles, fautes de routes et trop loin des villages.

Les précipitations sont de l'ordre de 4200mm par an au Nord de l'archipel, contre 2200 mm au Sud du pays. Les pluies varient également au sein d'une même île. Les littoraux reçoivent généralement moins de 2000 mm, tandis que le cœur montagneux des îles enregistre souvent jusqu'à 4000 mm. Les températures sont relativement constantes à travers l'archipel. De l'hiver austral (juin à aout) à la période cyclonique (décembre à février) les températures varient de 20 à 26°C.

Les tremblements de terre sont fréquents et selon le service de la météorologie la surface terrestre et maritime le Vanouatou reçoit 20 à 30 cyclones par décade. La population a su composer avec cette instabilité et ce depuis des millénaires.

1.4.2. Histoire

Cet archipel a été peuplé il y a 3200 ans environ par des populations venant du Nord-Ouest du pacifique. Ces populations ont amené avec elles leurs semences (Caillon, 2005). En 1606 l'espagnol Pedro Fernandez de Quiros découvre la grande baie d'Espirito Santo. En 1768 le français Louis Antoine de Bougainville arrive dans le Nord de l'archipel. Peu après, en 1774, l'anglais James Cook visite l'ensemble de l'archipel et le baptise du nom des Nouvelles-Hébrides.

Les français et les anglais entament une exploitation des ressources au début du 18^{ème} siècle, notamment du bois de santal et d'esclaves. Parallèlement, ils opèrent une évangélisation massive de la population, qui descend des montagnes pour s'installer sur les bords de mer. Cette course à la conquête des terres aboutie à un condominium franco-britannique en 1906. On assiste alors à une colonisation agricole, où caféiers, poivriers, vanilliers, maïs et cotonniers peinent à se développer. Ce sont surtout les grandes plantations de cocotiers qui prennent le pas sur les autres cultures. Après le retrait des troupes américaines à la fin de la seconde guerre mondiale, la présence franco-britannique est de plus en plus mise en question par de nouvelles aspirations politiques. Le 30 juillet 1980 que le pays, rebaptisé Vanouatou, devient indépendant.

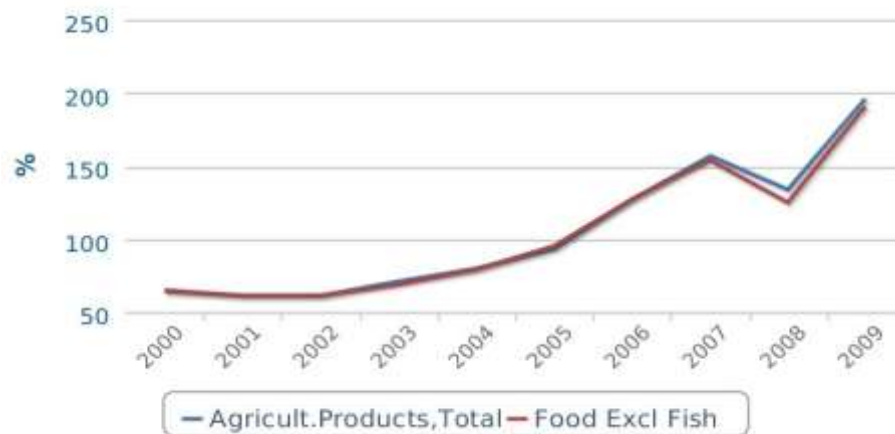


Figure 5. Augmentation des importations de produits agricoles et de denrées alimentaires
D'après FAO STAT 2012



Figure 4. Eli, agriculteur, devant sa nouvelle parcelle
de patates douces tout juste défrichée.
D'après Jung, 2012.

1.4.3. Contexte socio-économique

Selon la banque mondiale le Vanouatou a un PIB¹ de 819 millions de dollars américain en 2011. Le pays enregistre une croissance de 4% la même année. La population urbaine représente 24,4% de la population totale (National population and housing census, 2009). L'agriculture représente, elle, 60,5% des emplois, mais moins de 20% du PIB. En revanche le tourisme représente 70,4% du PIB. Quant à la part de l'industrie dans le PIB, elle s'élève seulement à 9,9% (BMCE, 2012). Ce tourisme florissant n'empêche pas le Vanouatou d'avoir un IDH² de 0,617 (PNUD, 2012), qui le classe au 125ème rang mondial, et de faire partie des pays les moins avancés³.

Après l'indépendance en 1980, de nombreux projets de développement encouragent les cultures de rentes. Ainsi de nombreux agriculteurs produisent du kava, du cacao, du coprah et du café destinés à la vente (Weightman, 1989). Le poivre et la vanille sont également introduits mais il y a peu de débouchés. Aujourd'hui seul Venui Vanilla (Ltd) achète ces produits destinés au tourisme intérieur. Pour des raisons structurelles, les conditions d'export du Vanouatou sont difficiles. Les prix du carburant augmentent et la distance à parcourir jusqu'aux marchés extérieurs est importante. Ainsi malgré les politiques agricoles tournées vers les cultures de rentes, ces dernières n'ont pas remporté un grand succès. En février 2012 le coprah représentait 19% des exportations, suivi du kava (14%) et du bœuf (13%).

Les cultures de rentes destinées à l'exportation se développent et diminuent le temps et la surface réservés aux cultures vivrières. Ward (1989) décrit la tendance, dans les îles du Pacifique Sud, à utiliser les "bons" sols pour les cultures de rentes, et l'extension des cultures vivrières vers des sols peu accessibles (Figure 4). Les produits de l'agriculture vivrière ont une valeur marchande qui permet d'avoir des revenus complémentaires, mais qui restent modestes car uniquement destinées au marché intérieur.

Parallèlement à cela les importations augmentent années après années à l'échelle nationale (Figure 5). Aujourd'hui, la plupart des villages ont accès à cette nourriture importée dans des petites épiceries qui les fournissent principalement en riz et en sucre.

Le changement de régime alimentaire entraîne des problèmes de malnutrition. Ainsi le surpoids et l'obésité sont fréquents, surtout dans les milieux urbains (FAO, 2010).

En 2012 l'archipel est peuplé de 260 000 habitants (VNSO, 2012). La densité du Vanouatou est de 19 hab/km². Il y a de grandes variations d'une île à l'autre (Siméoni et Lebot, 2012). La population augmente de 2,3% par an. Les deux principales villes du pays (Port-Vila et Luganville) grandissent et l'économie de subsistance y a cédé la place à une économie monétaire. Néanmoins la plus grande partie de la population est rurale et l'agriculture reste une part importante de la vie des ménages.

¹Produit intérieur brute.

² Indice de développement humain : évalue le niveau de développement humain en se basant sur trois critères : l'espérance de vie, le niveau d'éducation et le niveau de vie.

³ La sortie du Vanouatou du classement des pays les moins avancés est prévue pour 2016.

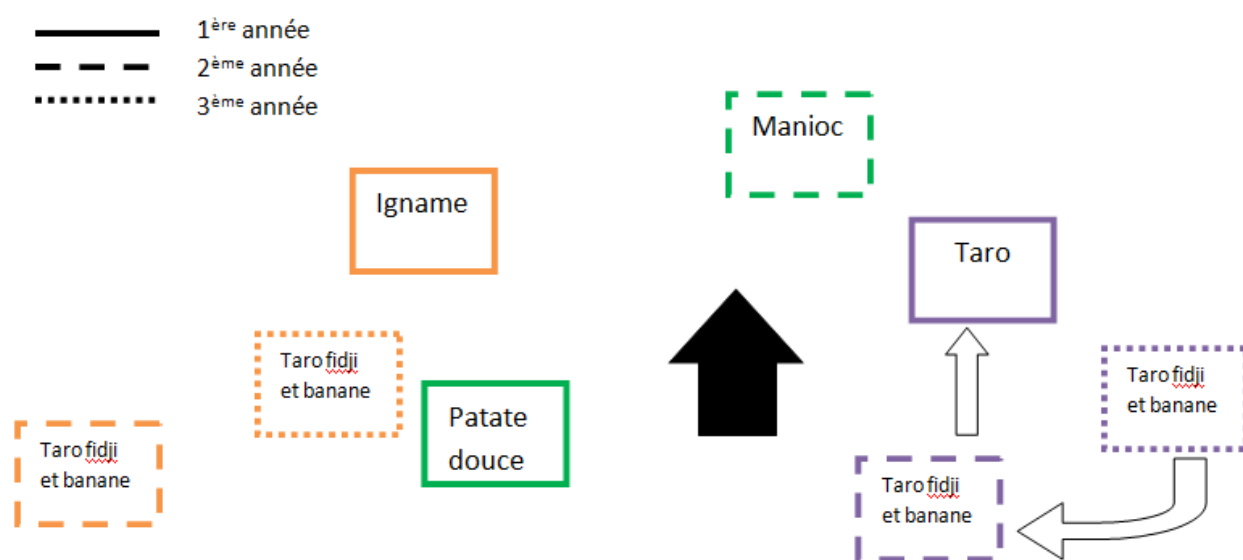


Figure 6. Schéma des systèmes de cultures mis en place par un ménage.

1.4.4. L'agriculture vivrière

Les principales cultures apportées par les mélanésiens sont le taro (*Colocasia esculenta*) et l'igname (*Dioscorea* spp). Il est admis que, encore dans les années 80, ce type de cultures était le pilier de l'agriculture dans le Pacifique Sud (Vergara et Nair, 1985). Une des principales innovations des systèmes de cultures vivriers est l'introduction au 19ème siècle de la patate douce, du manioc et du taro fidji. Ces cultures prennent de l'importance par rapport à l'igname et au taro, comme ce fut le cas à Madagascar (Vernier, 2011).

Aujourd'hui encore, la machette est l'outil de production de prédilection de l'agriculteur. C'est à l'aide de cet outil assez rudimentaire que chaque année l'agriculteur crée plusieurs éclaircies dans la forêt. Les déchets sont soit dégagés aux abords de la nouvelle parcelle, ou bien rassemblés en tas au pied des arbres que l'agriculteur ne veut pas conserver puis brûlés.

Ces systèmes itinérants mêlent horticulture et arboriculture, car il utilise des arbres pour leur production, leur ombre ou encore comme support physique. (Vergara et Nair, 1985). Selon Mazoyer et Roudart (1997), les cultures d'abattis brûlis sont des systèmes agro-forestiers séquentiels, car la forêt succède à un espace de culture, puis suit une phase de jachère.

Les maladies sont un vrai problème dans les îles Salomon depuis que l'on y importe de la nourriture (Mertz, 2012). En effet les racines et tubercules sont multipliés de manière végétative. De ce fait les variétés sont génétiquement très proches et peuvent être décimées par la même maladie. Au contraire au Vanouatou les maladies ont peu d'impact dans les jardins et les agriculteurs ne les connaissent, de ce fait, pas très bien.

La première année, la culture principale, l'igname ou le taro, est mise en place. Puis les cultures secondaires telles que la patate douce, le manioc ou le taro fidji prennent le relais (Figure 6). Parfois les cultures secondaires sont plantées la même année que la culture de tête d'assolement. Par exemple à l'Ouest de Malo les agriculteurs cultivent de l'igname (*Dioscorea alata*) en première année, et en deuxième année ils plantent du taro fidji (ou macabo) et des bananes (Allen, 2001). Dans les îles Salomon, et il en va de même au Vanouatou, l'igname et le taro sont remplacés peu à peu par le manioc et la patate douce (Mertz, 2012).

Tout au long du cycle de culture les racines et tubercules sont associées à d'autres types de culture. Ainsi les habitants diversifient leurs apports alimentaires. Le chou des îles (*Abelmoschus manihot*) est riche en calcium et en protéine, et de nombreux fruits viennent compléter le bol alimentaire. Ces multiples associations offrent un régime alimentaire varié et une protection face aux maladies. De plus, en morcelant la production au sein de diverses parcelles, les systèmes végécoles contribuent à la gestion des risques et apportent une sécurité face aux catastrophes naturelles.

Selon la coutume, les terres des jardins vivriers appartiennent à la communauté villageoise. La famille qui cultive cette terre n'en est pas propriétaire, elle obtient seulement un droit d'usage accordé par les chefs coutumiers (Bonnemaison, 1996). Parfois la terre est travaillée de manière collective. Traditionnellement les hommes sont chargés de l'aménagement de la parcelle (abattage des arbres, défrichage, brûlis et plantation de nouveaux pieds). Les femmes sont responsables, elles, du désherbage et s'occupent de la récolte. Néanmoins aujourd'hui cette répartition des tâches n'est plus aussi nette (Mani, 2012).

La période de culture « active » varie généralement de 2 à 3 ans (Morelli, 2003).



Figure 8. Variabilité morphologique entre différentes espèces d'ignames.
(Jung, 2012)



Figure 7. Variabilité morphologique entre différentes variétés de taros.
(Champagne, 2008)

Néanmoins défricher un jardin est un investissement en travail. Même si le travail du sol reste sommaire (simple trouaison), le principal intrant demeure la main d'œuvre. Il serait logique que l'agriculteur cherche à optimiser la productivité de son travail dans une parcelle au-delà des 2 ou 3 ans de culture dite « active ». Au Vanouatou il est fréquent de trouver des racines et tubercules sur des parcelles de 4 ou 5 ans. Ces réserves sur pied seront utilisées en cas de besoin, et représentent une sorte de « banque vivante en terre ». La parcelle est progressivement abandonnée. La phase de jachère permet la reconstitution du couvert arboré et donc de la fertilité des sols. Dans les systèmes de culture végécoles du Vanouatou, les agriculteurs ne participent pas à la reconstitution des sols en jachère. Au contraire ils continuent à prélever certaines plantes, comestibles ou médicinales.

La population du Vanouatou augmente, et avec elle les besoins alimentaires. Certaines îles n'ont plus beaucoup de terres disponibles pour nourrir cette population grandissante. L'archipel n'échappe pas à une forme d'intensification qui consiste à diminuer les temps de jachère et augmenter la période de culture (Morelli, 2003). Or les systèmes d'agriculture itinérante sur brûlis reposent sur une durée de jachère assez longue pour permettre de reconstituer suffisamment les caractéristiques chimiques du sol. En effet, sans intrants cette reconstitution se fait par un « fonctionnement forestier ». Les minéraux lixiviés sont captés par les racines profondes des arbres, stockés dans les feuilles puis réintégrés au sol après la chute de ces dernières. Cette dynamique nécessite plusieurs années avant de se remettre en place (Mazoyer et Roudart, 1997). Comme les durées de jachères tendent à diminuer, on s'attend à un appauvrissement des sols et donc à une baisse des rendements.

1.5. Contraintes à l'estimation du rendement

Les jardins des systèmes végécoles n'ont pas une forme géométrique. Et si les jardins de première année sont à peu près nettoyés, la végétation recolonise la parcelle dès la deuxième année, et les limites de la parcelle deviennent floues et les déplacements difficiles. Or, étant donné que les rendements sont une production ramenée à une surface. La mesure de cette dernière est une contrainte à l'estimation du rendement.

L'autre composante du rendement est la production. Mesurer la production de ces systèmes n'est pas chose aisée. Les rendements sont exprimés le plus souvent en tonnes par hectare et par an. Or les racines et tubercules sont parfois récoltés au bout de trois ans (Ngopya, FAO, 2002). De plus dans les systèmes vivriers traditionnels elles sont souvent en association avec d'autres cultures. Lors de ses inventaires sur 297 parcelles au Vanouatou, Blanco a trouvé en moyenne 10 espèces différentes sur des parcelles de 321m² en moyenne. La richesse variétale est en moyenne de 8 variétés différentes pour chaque espèce (Blanco, 2011). La variabilité morphologique au sein d'une même espèce et d'une même variété est importante (Figures 7 et 8). Le calendrier culturel est flexible, mis à part pour les ignames. Le chevauchement des cycles de croissance des différentes espèces rend difficile l'approche de ces systèmes. Cette complexité rend ces systèmes illisibles par rapport aux grilles de lecture qui ont été développées pour les céréales, par exemple. Mesurer le rendement à travers toutes ces contraintes n'est pas chose aisée mais l'enjeu est important car le rendement global d'un jardin peut se révéler très intéressant pour l'agriculteur (Mertz, 2012).

1.6. Synthèse bibliographique des méthodologies

Pour mesurer la taille des parcelles, il est possible de mesurer le périmètre à l'aide d'un mètre ruban, en reportant les angles sur un schéma, puis utiliser un planimètre afin de convertir la surface obtenue en mètre carré (Morelli, 2003). Au Rwanda, les rendements ont été obtenus par une nouvelle mesure de la surface appelée « Perimeter Squared over area » (Mpyisi, FAO, 2002). Le problème pour cette méthode est qu'il faut connaître la forme du champ. De manière générale les mesures d'angles et de périmètres donnent des surfaces fiables, mais elles sont fastidieuses à utiliser.

Aujourd'hui de nombreux modèles de GPS grand public permettent de calculer la surface instantanément. Cependant la précision de ce type de GPS a ses limites, et il est préférable de répéter plusieurs fois les mesures, notamment lorsque la forêt avoisinante est dense et/ou la couverture nuageuse importante.

De nombreux chercheurs se sont penchés sur l'estimation de la production des racines et tubercules, comme en Thaïlande par l'administration de questionnaires auprès des ménages afin d'évaluer leur production de manioc. Mais cette méthode sous-évaluait la production et de plus il était difficile au ménage de répondre à ce questionnaire, jugé trop compliqué (Amnuay Chalit, FAO, 2002). Ngondé (dans FAO, 2002) propose des voies d'amélioration. Par exemple il propose de prendre en compte l'appareil aérien des racines et tubercules dans les calculs de rendements, et non plus seulement les organes de réserve. Il propose aussi de tenir compte du poids spécifique à chaque variété. Malheureusement la bibliographie ne permet pas toujours de rendre compte de ces différences. Selon lui la mesure des rendements devrait se faire de manière hebdomadaire. Au Congo, Tollens (dans FAO, 2002) a mené une évaluation de la production de manioc. Pour cela il a enregistré chaque semaine la production de 1040 ménages durant un an. A l'issue de cette étude poussée, les résultats étaient 72,2% supérieur aux estimations nationales. En effet les produits végétaux cultivés selon ce type d'agriculture itinérante sur brûlis ont toutes les chances de se trouver exclus des enquêtes agricoles ordinaires. Des résultats similaires ont été obtenus avec une approche mensuelle. Mesurer l'abondance des plantes au moment de la récolte et connaître le poids moyen de chaque plante sont les deux points clés de la méthode développée par en Côte d'Ivoire Dumbia (FAO, 2002).

Dans toutes ces études les experts s'accordent sur le fait que de fréquentes visites sont nécessaires pour estimer précisément la production. Pour cela les projets de recherche sur les systèmes végétaux ont besoin de recenseurs et de moyens conséquents afin d'effectuer des mesures mensuelles ou hebdomadaires. Parce que ces moyens ne sont pas toujours disponibles, les études sur les systèmes végétaux sont peu nombreuses.

Une autre méthode de calcul des rendements consiste à peser la production totale de quelques parcelles (Mertz, 2012). Cette stratégie implique un dédommagement des agriculteurs, et donc bien souvent peu de parcelles traitées. De plus, dans ces systèmes de plantation et de récolte continue, cette méthode ne permet pas de rendre compte de la production totale des parcelles, certaines plantes n'étant pas à maturité.

Enfin en 2003, Morelli a élaboré une méthode permettant d'estimer la production des systèmes végétaux du Vanouatou en quelques mois. Cette méthode, dont nous sommes inspirés, est basée sur un inventaire de toutes les plantes de toutes les espèces présentes sur une parcelle. A chaque espèce est attribué un poids standard par plantes.

1.7. Nouvelle méthodologie et nouveaux outils

Notre travail s'inspire de la méthodologie de C. Morelli et propose des améliorations visant à la rendre plus opérationnelle. Le choix du GPS pour la mesure de la surface de la parcelle rend la tâche plus rapide. La méthodologie de Morelli s'applique à construire le calendrier de la parcelle. Cela permet de connaître toutes les plantes qui ont été cultivées sur cette parcelle pendant l'année. Cependant cela nécessite un long entretien avec l'agriculteur, avec les imprécisions que cela implique. Un inventaire de tout ce qui se trouve sur la parcelle est exact et rapide. On peut donc visiter non seulement celles dans la phase de culture active mais aussi jusque cinq ans après l'ouverture de la parcelle. Ainsi l'évolution des rendements au cours des cinq premières années du cycle de culture peut être observée. L'enquête couvre donc toute la période productive du système de culture mis en place.

Les rendements sont calculés par parcelle en tonnes par hectare et par an. Une des innovations consiste à calculer le rendement d'un système. C'est-à-dire à savoir sur cinq ans combien de tonnes de plantes amylacées le système a produit chaque année.

Une nouvelle base de données riche de 1096 échantillons de racines et tubercules est utilisée afin de connaître leur composition en macroéléments (Végé-Culture, 2012).

L'étude de la composition chimique des sols est également inédite. Quantin a mené une étude de grande ampleur sur les sols de l'archipel. Depuis Allen s'est penché sur les sols de Malo (2001) et Lamanda (2005) sur l'évolution des sols sous plantation de cocotiers. Néanmoins aucune étude n'a été réalisée sur l'évolution des sols des Parcelles vivrières au cours du cycle de culture.

Toutes les analyses chimiques ont été réalisées par le laboratoire Teyssier à Bordeaux.

1.8. Cadres et hypothèses de travail

Nous allons concentrer notre étude sur le rendement des principales espèces amylacées, base de l'alimentation au Vanouatou, à savoir le taro (*Colocasia esculenta*) et le taro fidji (*Xanthosoma sagittifolium*), l'igname (*Dioscorea* spp.), la patate douce (*Ipomoea batatas*), le manioc (*Manihot esculenta*), et la banane (*Musa* spp.).

Le terrain se limitera aux parcelles vivrières. Ces parcelles sont différentes des jardins de cases car ils ne sont pas situés aux abords des maisons. Ces parcelles sont souvent exclusivement vivrières, néanmoins elles peuvent contenir des cultures de rentes, comme certaines parcelles de kava (*Piper methysticum*). Ils ont intégrés à l'échantillonnage à partir du moment où ils sont exploités totalement ou en partie pour leurs productions vivrières.

Ce sont uniquement les racines et tubercules qui sont transportés jusqu'au foyer ou dans une autre parcelle. Les tiges et les feuilles restent sur place. Pour cette raison

les rendements n'incluent pas les feuilles, uniquement les racines et les tubercules exportés de la parcelle. Mais si l'étude se trouve dans un contexte où les feuilles sont consommées, il est important de les considérer dans les exportations. Nous faisons le postulat qu'à chaque espèce correspond un poids standard à maturité. Nous considérons que toutes les plantes sont récoltées à maturité. Les maladies ne sont pas prises en compte, n'étant que peu répandues au Vanouatou.

Nous avons donc adopté une approche diachronique. Cinq années après leur ouverture, les parcelles sont toutes en jachères. Etudier simultanément les parcelles de ces cinq années à un temps t permet de voir l'évolution des rendements au cours du temps. En faisant l'hypothèse que ces cinq parcelles défrichées au cours des cinq dernières années suivent le même itinéraire, on peut reconstruire le système de culture mis en place par l'agriculteur.

Lors de cette étude, nous ne chercherons pas à établir la liste exhaustive de tous les facteurs pouvant impacter le rendement des parcelles. Tout d'abord parce que l'étude se déroule en milieu réel. Les facteurs climatiques, édaphiques, environnementaux des parcelles sont nombreux et les pratiques culturelles variées. Ensuite parce que tous ces facteurs sont en interaction et qu'il est difficile de quantifier l'effet de ces interactions. D'autant qu'un des facteurs les plus importants agissant sur la production des racines et tubercules est le poids du semenceau mis en terre (Lebot, 2009). Or cette donnée nous est difficile à retrouver.

Les informations collectées seront utilisées pour répondre aux hypothèses suivantes.

A partir de travaux antérieurs, nous formulons une série d'hypothèses que nous allons vérifier :

- Il y a un effet « village » sur les rendements (en effet selon les contextes connus des différents villages nous pensons que les rendements varient)
- Il y a un effet « âge de la parcelle » sur les rendements (on s'attend à un appauvrissement des sols au cours du cycle de culture)

Ces deux postulats se basent sur des sous hypothèses, exprimées dans le tableau 1 :

Facteurs influençant le rendement	Formulation de l'hypothèse
La composition chimique des sols	Les rendements dépendent de la matière organique et des minéraux présents dans le sol.
La pression anthropique	La surface en terres disponibles par habitant peut influencer le rendement.
Les revenus des ménages	L'augmentation des revenus entraînent une diminution des rendements (les agriculteurs se désintéressent de leurs parcelles)
Les cultures mises en place	La culture de tête d'assolement (taro, igname, patate douce, et manioc) a un effet sur la densité de plantation et donc sur le rendement.
La proximité des parcelles	L'éloignement des parcelles aux villages entraîne une diminution des rendements.
La durée de jachère	Plus les jachères sont longues plus les rendements sont élevés.

Tableau 1. Hypothèses

De manière générale tous les éléments pouvant avoir des effets sur le rendement interagissent. Les résultats devront donc permettre d'appréhender ces interactions.

La partie qui suit s'applique à décrire la nouvelle méthodologie.

Le terroir des quatre nakamals de Lamlou sur l'île de Tanna

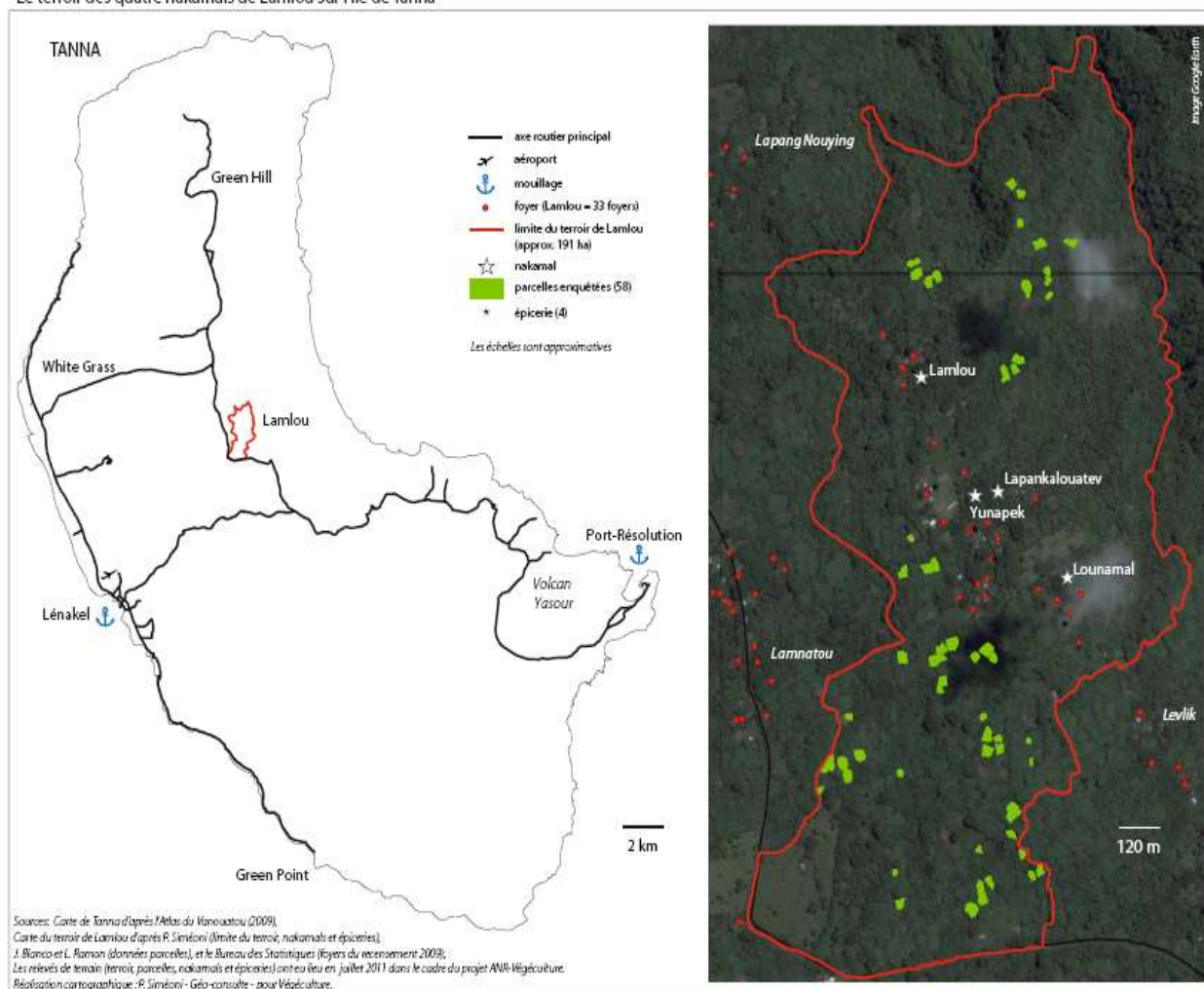


Figure 9. Proximité des jardins de Lamlou, sur l'île de Tanna.
D'après Siméoni, 2009

2. Matériels et méthodes

2.1. Echantillonnage

2.1.1. Sélection des îles et des villages

Les îles ont été sélectionnées par la tâche 1 du projet. Elles ont été classées par rapport à leur superficie de bonne terre disponible pour l'agriculture vivrière. Pour cela les superficies de bonnes terres (Quantin, 1980) consacrées aux plantes pérennes, à l'extraction d'éléments minéraux, aux pâturages et aux baux fonciers leurs ont été soustraites à la superficie totale sur chaque île. Connaissant la population de chaque île, ces dernières sont classées selon la surface de bonnes terres disponibles par ménage (Lebot et Siméoni, 2012).

Les îles atypiques ont été éloignées de l'étude et ce sont les îles touchant une grande part de la population qui ont été retenues. Les sites du projet Végé-culture sont au nombre de six, et se classent selon un gradient des pressions anthropiques. Nous distinguons trois sites en zone de faible pression démographique et trois autres sites sont représentatifs de forte pressions. Les îles de fortes pressions sont Tanna, Ambaé et Pentecôte. Les îles de faible pression sont Santo, Malo et Mallicolo.

Un village a été sélectionné sur chaque île. Les villages ont été choisis pour être représentatifs de la situation de ces îles, et bien documentés.

Chacun des six villages a une situation bien spécifique, de part sa culture dominante (igname ou taro), la proximité des parcelles par rapport aux habitations (Figure 9), ou encore les sources de revenus des habitants (Tableau 2).

Iles	Villages	Pression anthropique (ha/foyers)		Culture dominante	Proximité des parcelles*	Revenus agricoles	Revenus totaux
Malo	Avounaleleo	27,8	Forte	Igname	Oui	644 140	2 962 280
Santo	Pésséna	18,4	Forte	Taro	Non	3 271 500	9 007 000
Mallicolo	Brenwé	10,1	Forte	Igname	Non	3 042 908	6 130 316
Ambaé	Lolossori	5,6	Faible	Taro	Oui	746 775	3 886 550
Tanna	Lamlou	2,8	Faible	Taro	Oui	862 000	4 156 000
Pentecôte	Tansip	0,3	Faible	Taro	Oui	785 730	2 930 710

Tableau 2. Description des six villages

* Si les parcelles se situent à moins d'une heure de marche, alors on les considère comme proches.

Sources : la pression anthropique a été établie par Siméoni, 2012 ; les revenus des ménages ont été établis par Haudebourg, 2012

2.1.2. Sélection des ménages

Pour comparer les rendements des systèmes, nous avons choisi une unité fixe qui est le ménage. Ces derniers ont été sélectionnés de manière à éviter les cas extrêmes. L'objectif est d'obtenir une estimation de la production familiale. Nous avons cherché à travailler avec des agriculteurs ayant en charge une famille.

Un contact dans chaque village nous a aidé à rassembler cinq agriculteurs. Leur disponibilité a également conditionnée la sélection.

2.1.3. Sélection des parcelles

La sélection des parcelles s'est faite en deux temps.

Le premier critère de sélection est l'âge des parcelles.

L'approche diachronique requiert l'étude des parcelles en année 1, 2, 3, 4 et 5. En effet, après cinq années de culture, les parcelles sont mises en jachère, et la

production devient quasiment inexistante. Pour plus de précision, l'âge de la parcelle est d'abord exprimé en mois, pour être ensuite converti en année selon le tableau 3. Les parcelles de cinq ans correspondent à cinq ans et plus.

Age en mois	Année correspondante
<12	1
$12 \leq x < 24$	2
$24 \leq x < 36$	3
$36 \leq x < 48$	4
> 48	5

Tableau 3. Conversion de l'âge des parcelles de mois en années.

Le plus simple est de reconstruire la chronoséquence parcelle après parcelle, dans l'ordre chronologique. Dans un premier temps on se rend sur une parcelle que l'agriculteur a défrichée lors de l'année de l'enquête. Une fois que toutes les informations sont recueillies, nous avons demandé d'où venaient les boutures. L'agriculteur nous conduisait alors à la parcelle de l'année précédente, c'est-à-dire la parcelle d'année 2. Afin de rejoindre les parcelles d'années 3,4, et 5, la même question peut se poser (Figure 10).

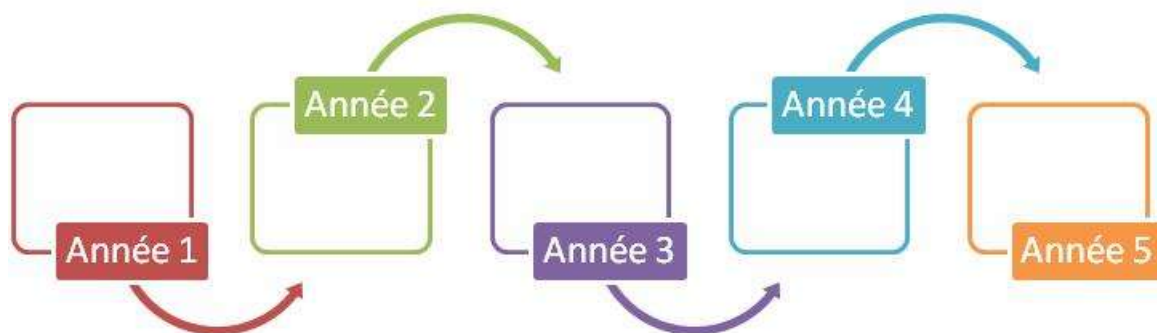


Figure 10. Approche diachronique

Le deuxième critère de sélection est l'historique des parcelles. Il faut que les parcelles aient une histoire agricole similaire pour qu'elles puissent être considérées comme étant du même système. C'est-à-dire avoir eu le même itinéraire technique, une durée de jachère relativement équivalente ou encore le même type de culture. Par exemple, si l'on vient de visiter une parcelle d'année 1 composée d'igname, s'assurer que la parcelle d'année 2 comptait également des ignames l'année passée. En faisant l'hypothèse que ces cinq parcelles défrichées au cours des cinq dernières années suivent le même itinéraire, on peut reconstruire le système de culture mis en place par l'agriculteur.

2.1.4. Sélection des plantes

Les plantes étudiées sont les plantes amylacées telles que l'igname, le taro, le taro fidji, le manioc, et la patate douce. L'ensemble des variétés de ces espèces sont prises en compte avec cette méthode.

Au regard des parcelles représentatives du Vanouatou nous avons inclus les bananes (*Musa* spp.) dans l'étude. En effet on les trouve sur les mêmes parcelles, mêlées aux espèces qui produisent des racines et des tubercules.

2.1.5. Prélèvement des sols

Le prélèvement de sol s'effectue sur l'horizon 0-20 cm. A l'aide d'un couteau, on mélange le sol afin de pouvoir prélever l'équivalent d'une poignée de terre.

Cinq prélèvements des sols sont effectués dans une parcelle. Les cinq prélèvements sont regroupés dans un même sac plastique.

Dans les jours qui suivent, les sacs sont séchés au soleil. Une fois secs, les sacs de terres sont refermés et envoyés au laboratoire pour analyses chimiques. En tout 13 caractéristiques ont été analysées :

- Le taux de matière organique (MO) ;
- La capacité d'échange cationique (CEC) ;
- La quantité de phosphore (P₂O₅) ;
- La quantité de potassium (K₂O) ;
- La quantité de magnésium (MgO) ;
- La quantité de calcium (CaO) ;
- La quantité de sodium (Na₂O) ;
- La quantité d'azote total (N tot) ;
- Le pH eau ;
- Le pH KCl ;
- Le rapport C/N ;
- Le pourcentage de calcaire total ;
- Le pourcentage de calcaire actif ;

2.2. *Déroulement des observations et des enquêtes*

Tout d'abord il est important de connaître le nombre de personne à charge et donc à nourrir au sein d'un foyer.

L'âge d'une parcelle est la première information à recueillir auprès d'un agriculteur. Une fois au champ il est plus facile d'estimer la durée de jachère, et d'identifier les cultures en place l'année précédente.

On peut ensuite procéder à la mesure de la surface de la parcelle, aux prélèvements de sol, ainsi qu'à l'inventaire des variétés retenues pour l'étude.

Les informations d'ordres économique et social sont autant de clés de compréhension des systèmes de cultures. Une fois que le système de culture est connu, il est plus aisé de détecter des disparités et ainsi d'apporter des compléments grâce à un entretien avec l'agriculteur. La stratégie de l'agriculteur, et d'autres éléments d'ordre socio-économiques peuvent aider à l'interprétation des différentes situations rencontrées. Par exemple, la préparation d'un mariage par un père de famille peut permettre d'expliquer l'augmentation des surfaces importantes mises en cultures.

2.3. *Elaboration du rendement*

2.3.1. Mesure de la surface

La surface des parcelles a été mesurée par un GPS (Garmin R GPSmap 62s) et la fonction « calcul de surface ». L'agriculteur indique pas à pas les limites de sa parcelle, dont on fait le tour avec le GPS. Cette opération est à répéter trois fois pour s'assurer de la précision de la mesure. On retiendra la moyenne des trois surfaces obtenues.

2.3.2. Inventaire des espèces

Dans les systèmes végécoles, les surfaces des parcelles sont petites et dans la plupart des cas les différentes espèces sont mixées, le plus simple est de compter chaque pied de chaque variété. L'aide de l'agriculteur est appréciée, surtout en ce qui concerne les espèces d'ignames. Des photos permettent également de les identifier ultérieurement.

Lorsque les parcelles sont grandes et que la même espèce a été plantée en ligne de manière régulière, il est plus rapide d'estimer la densité en mesurant l'espacement entre les lignes et entre les pieds au sein des lignes. Par exemple, si l'espacement entre les pieds est de 1,5m la densité sera de 0,44 pieds/m². Ensuite le tour de la surface de plantation avec le GPS permet d'obtenir la surface concernée.

Néanmoins ce dernier cas de figure a été rare.

En tous les cas nous ne nous sommes intéressés qu'aux plantes qui se trouvent sur la parcelle au moment de la visite, qu'elles soient en terre ou dans de petits abris. La seule condition est qu'elles aient été plantées dans l'année. Par exemple s'il reste des ignames de l'année précédente dans un abri, elles n'ont pas été prises en compte. Seule la production de l'année en cours nous intéresse.

2.3.3. Calcul du rendement de matière fraîche d'une parcelle

Le nombre de pieds par espèce, est ensuite mis en relation avec le poids standard rattaché à chaque variété. On multiplie ensuite le poids standard d'un pied par le nombre de pied pour obtenir la production de cette espèce à l'échelle de la parcelle.

Pour les bananes le rendement a été ajusté comme suit. En effet si le taro, l'igname et le manioc ont un cycle qui se rapproche d'un an, un bananier, lui, produit un régime tous les neufs mois environ. Cette production a été ramenée à l'année par le calcul suivant.

$$\text{Rendement annuel d'un bananier} = x \times 12 \div 9$$

(x étant la production d'un régime)

De même pour le taro fidji, car cette espèce a la particularité de produire moitié moins les années qui suivent après sa première récolte. Pour cette raison un poids de production double a été attribué aux taros fidji présents dans des parcelles de première année.

La patate douce a un cycle de croissance de quatre mois. Néanmoins les agriculteurs ne plantent pas systématiquement de la patate douce trois fois dans l'année. Et dans la plupart des cas ils n'ont pas encore planifié d'en replanter. Cette plante a donc reçu le même traitement que les autres racines et tubercules, à savoir une récolte par an sans ajustement.

Le poids standard est connu grâce à des recherches bibliographiques (Annexe 1). Cette information est croisée avec des pesées de terrain.

La production d'une parcelle est la somme de toutes les productions de toutes les espèces de cette parcelle. Toutes les productions de matière fraîche sont donc additionnées.

Cette production totale est divisée par la surface, pour obtenir le rendement en tonnes par hectares.

2.3.4. Calcul du rendement de matière fraîche par système

Pour obtenir le rendement à l'échelle du système, toutes les surfaces des parcelles d'année 1, 2, 3, 4 et 5 d'un même ménage ont été additionnées. De même pour les productions en matière fraîche de chaque parcelle. Les parcelles d'une même chronoséquence ont été considérées comme une seule et grande parcelle.

Ainsi la surface et la production du système sont connues. La production, une fois divisée par la surface, permet d'obtenir le rendement du système en tonnes par hectares.

2.3.5. Production de matière sèche

Chaque espèce a un pourcentage de matière sèche différent et il en va de même pour les variétés au sein de la même espèce. Pour cette raison les productions de chaque pied sont multipliées par le pourcentage de matière sèche moyenne propre à chaque espèce. Ce pourcentage a été obtenu par des recherches bibliographiques (Champagne, Legendre et Lebot, 2009) Il est préférable de recouper cette information par des matières sèches effectuées en laboratoire, afin de vérifier que les matières sèches des plantes amylacées étudiées correspondent bien à celles de la bibliographie, obtenues dans d'autres contextes.

Le rendement en matière sèche est exprimé en tonnes par hectare.

2.3.6. Calcul de la teneur en macro éléments

De même que pour le taux de matière sèche, chaque espèce contient une certaine quantité d'amidon, de sucres, de cellulose, de protéines, et de minéraux. Une base de données de 1096 accessions des quatre racines et tubercules étudiés a été élaborée ces dernières années à Port-Vila (Végé-Culture, 2012).

Nous avons recoupé ces données, propres au Vanouatou, par des références bibliographiques générales.

Ces teneurs sont exprimées en pourcentage de matière sèche. Le rendement en macro éléments est exprimé en tonnes par hectare.

2.4. *Traitement des données*

Les séries de données ne suivent pas une loi normale. Les comparaisons de moyennes ont donc été effectuées par des tests non-paramétriques. Pour comparer deux échantillons appariés (mêmes parcelles comparées selon un même critère), le test de Wilcoxon a été utilisé. Si les échantillons sont indépendants le test de Mann-Whitney est alors plus adapté. Pour comparer les moyennes de plus de deux échantillons, le test de Friedman a été utilisé. S'il ne s'agit pas des mêmes parcelles le test de Kruskal-Wallis est recommandé. Dans le cas où ces tests indiquent une différence significative, la correction de Bonferroni permet de voir quels individus sont significativement différents des autres. Pour obtenir des blocs complets afin d'utiliser la correction de Bonferroni (par exemple avoir le même nombre de parcelles dans chaque villages), les données manquantes ont été remplacées par les valeurs moyennes.

Pour tester les corrélations, la non-normalité de la distribution ne permet pas d'utiliser le coefficient de Pearson. Le coefficient de corrélation de Spearman permet de tester des corrélations entre deux variables et plus.

De même, les ACP ont été paramétrées avec un coefficient de corrélation de Spearman.

L'analyse des données a été menée à l'aide du logiciel Xlstat Pro 2009.

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Total
Avounaleleo	5	7	7	8	5	32
Brenwé	13	11	12	12		48
Lamlu	22	13	9	9		53
Lolossori	10	10	4	7		31
Pésséna	13	4			8	25
Tansip	20	11	4			35
Total	83	56	36	36	13	224

Tableau 4. Répartition des parcelles par villages et par année de culture.

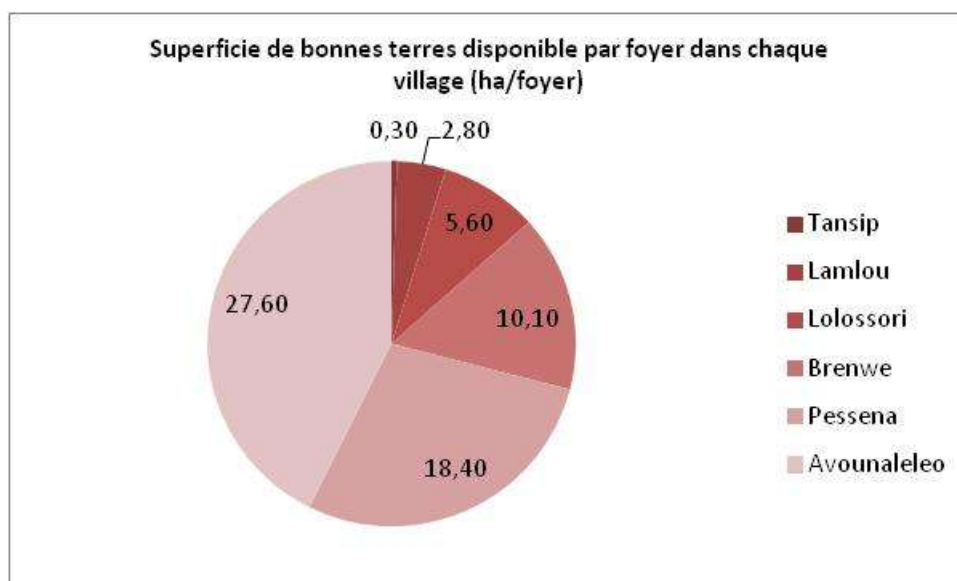


Figure 11. Surfaces de bonnes terres disponibles par foyer

Les résultats proviennent d'un réseau de 224 parcelles réparties dans 65 ménages situés dans six villages. Les revenus des ménages ont pu être obtenus pour 203 parcelles sur les 224 inventoriées (Haudebourg, 2012). Lorsque les revenus sont mis en relation avec d'autres caractéristiques, l'échantillon est donc réduit à 203 parcelles.

Nous commencerons par la caractérisation des parcelles vivrières du Vanouatou, et les dynamiques en œuvre. En deuxième partie nous chercherons à savoir si le rendement d'un cycle de culture est différent selon le village. Ensuite les hypothèses secondaires seront testées afin de comprendre à quoi est dû cet effet village. A savoir, est-ce le sol, la pression anthropique ou l'obtention de revenus qui conditionnent les rendements ? Dans une troisième partie nous étudierons le rendement à l'échelle de la parcelle afin de voir son évolution au cours du cycle de culture. Enfin nous aborderons les rendements à travers leurs contraintes, spatiale et temporelle, afin de voir quels paramètres ont le plus d'impact. La dernière partie est une approche nutritionnelle des rendements obtenus.

3. Résultats

3.1. *Les principales caractéristiques des systèmes végétaux et leurs interactions*

Dans le but de vérifier l'hypothèse selon laquelle l'augmentation de la pression anthropique entraîne des changements dans les systèmes de culture, nous allons à chaque fois commencer par mettre en relation la pression anthropique avec les autres paramètres, à savoir la surface des parcelles, l'âge des parcelles, la composition chimique du sol de ces parcelles, la durée de la jachère dans le système de culture, et les revenus des ménages. Nous montrerons également comment ces paramètres interagissent, notamment avec le type de culture de tête d'assolement.

3.1.1. Répartition des données

Le tableau 4 indique la répartition des parcelles visitées en fonction du village dans lequel elles se trouvent et de leur âge.

Des classes d'âges sont manquantes dans certains villages. Cela ne veut pas dire qu'elles n'existent pas. Ces données manquantes sont dues au fait que sur le terrain les agriculteurs n'ont pas montré ces parcelles. Les parcelles ne sont pas réparties équitablement selon les années. En effet il y a 83 parcelles de première année, et leur nombre diminue au cours du temps jusqu'à 13. Les moyennes obtenues sur les parcelles ouvertes récemment seront donc plus fiables que celles obtenues sur les parcelles ouvertes depuis 5 ans

La répartition des parcelles par village est, quant à elle, plus égalitaire. Dans chaque village ont été observées entre 25 et 53 parcelles.

Cet échantillonnage va nous permettre de connaître l'effet village et l'effet du temps sur les variables.

La Figure 11 présente la surface de bonnes terres disponibles par village.

Surface moyenne (m ²)	Ecart type	Minimum (m ²)	Maximum (m ²)
545,46	570,38	42,00	4772,00

Tableau 5. Description de la taille des parcelles.

Les calculs ont été faits à partir des l'ensemble des données, et non pas des moyennes par village.

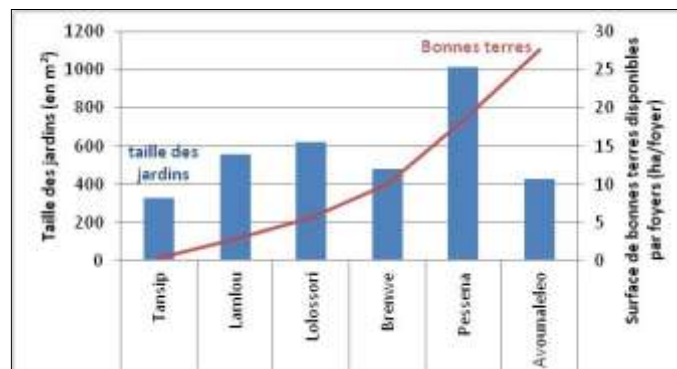


Figure 12. Taille des jardins et surface de bonnes terres.

Culture de tête d'assolement	Surface moyenne des parcelles (m ²)	Groupes*
Autres	293	A
Igname	461	B
Taro	360	B
Patate douce	390	B
Kava	2052	C

Tableau 6. Moyenne des surfaces en fonction de la culture dominante.

* Les groupes ont été obtenus d'après le test de comparaison multiple de Bonferroni en sélectionnant l'ensemble des données

Moyenne d'âge (mois)*	Écart type	Minimum (mois)	Maximum (mois)
24,37	25,40	0,00	239,00

Tableau 7. Age des parcelles, statistiques descriptives..

*La moyenne a été calculée à partir de l'ensemble des données.

3.1.2. La taille des parcelles

Il est rare que la surface des parcelles atteigne un hectare. La surface moyenne des parcelles est de 545,5 m² avec un écart-type de 570,5 (Tableau 5). En effet, les parcelles sont de taille très variable, avec un minimum de 42 m² et un maximum de 4772 m².

Au regard de l'écart type, on constate qu'il y a une différence de taille entre les îles. La surface des parcelles à Pésséna (1011 m²) est quatre fois plus élevée qu'à Tansip (325 m²). Cette différence nous amène à nous poser la question de savoir si le fait d'avoir de l'espace pour établir une parcelle conduit-il à cultiver sur de plus grandes surfaces ? La figure 12 donne l'impression qu'il n'y a pas d'interaction entre la surface des parcelles et la surface de bonnes terres disponibles. Le test de corrélation de Spearman confirme que la taille des parcelles ne dépend pas de la surface disponible par village. La corrélation entre ces deux variables n'est pas significative (p-value=0,518, $\alpha=0,05$). Les parcelles sont petites même si l'espace dont dispose le ménage est grand.

En revanche la culture de tête d'assolement est corrélée à des différences de tailles de parcelles significatives. D'après la correction de Bonferroni, les parcelles de kava sont significativement plus grandes que celles d'ignames, de taros et de patates douces (Tableau 6). On voit que les agriculteurs de tous les villages confondus plantent ces trois dernières cultures dans des parcelles de même envergure, entre 350 et 500 m².

Certaines parcelles n'ayant pas de culture dominante de tête d'assolement n'ont pas été intégrées dans la typologie. Il s'agit des parcelles de soudure ou des parcelles vivrières modernes (constituées majoritairement d'espèces nouvellement introduites telles que du manioc et de la patate douce). Ces parcelles ont la particularité d'être plus petites que celles cultivées avec une culture dominante.

3.1.3. L'âge des parcelles

Les parcelles visitées ont en moyenne 24,37 mois, soit environ 2 ans, avec un maximum de 239 mois pour une parcelle de kava à Pésséna. L'écart type est de 25,40 (Tableau 7).

Etant donné le protocole, qui consiste à visiter cinq parcelles d'année 1, 2, 3, 4 et 5, il ne devrait pas y avoir de différence entre les villages. Mais il se trouve qu'à Tansip ou à Lamlou les périodes de culture ne s'étendent pas jusqu'à 5 ans. Ce résultat permet, toujours selon la correction de Bonferroni, d'identifier les villages différents des autres (Tableau 8). Ainsi Lamlou et Tansip sont des villages où l'âge moyen des parcelles ne dépasse pas un an et demi environ. En revanche Avounaleleo, Brenwé et Pésséna ont des parcelles mis en culture en moyenne entre deux et trois ans.

	Moyenne d'âge (mois)	Groupes			
Lamlou	16,49	A			
Tansip	13,46	A	B		
Lolosori	22,03		B	C	
Pésséna	39,04			C	D
Brenwé	28,13			C	D
Avounleleo	34,5				D
Moyenne*	25,61				
Ecart type	10,09				

Tableau 8. Age moyen des parcelles par village.

*La moyenne a été calculée à partir des moyennes de villages.

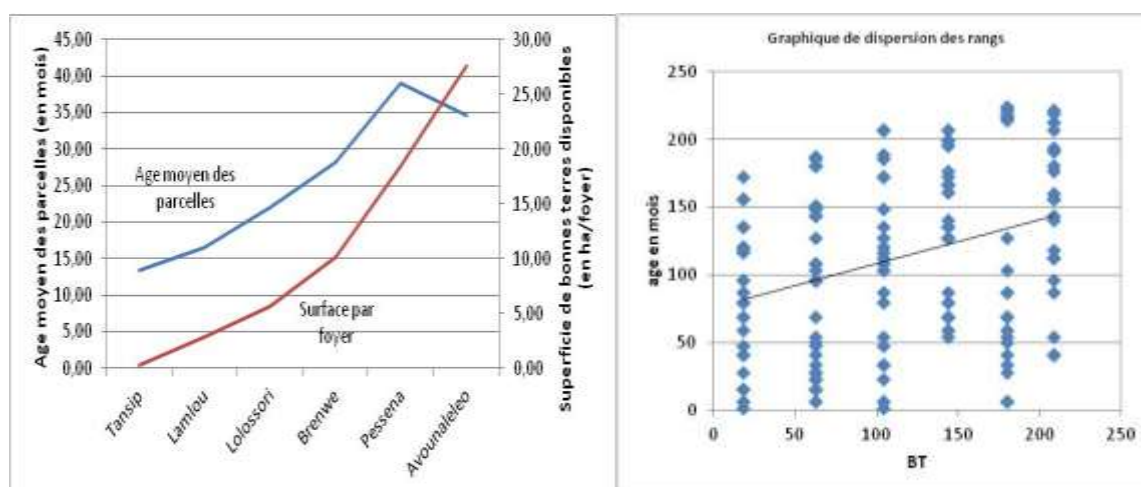


Figure 13. Age des parcelles en fonction de la superficie de bonnes terres disponibles.

	BT	CEC	MO	P2O5	K2O	MgO	CaO	Na2O	N tot	C/N	pH
BT	1,000										
CEC	0,301	1,000									
MO	0,288	0,627	1,000								
P2O5	-0,036	-0,094	-0,256	1,000							
K2O	0,417	0,608	0,347	0,115	1,000						
MgO	0,691	0,627	0,443	-0,006	0,754	1,000					
CaO	0,646	0,749	0,520	0,109	0,711	0,827	1,000				
Na2O	-0,275	0,347	0,382	-0,428	-0,012	-0,088	0,030	1,000			
N tot	-0,051	0,614	0,761	-0,371	0,282	0,258	0,389	0,604	1,000		
C/N	0,220	-0,397	-0,343	0,344	-0,121	-0,026	-0,170	-0,533	-0,828	1,000	
pH	0,571	0,447	0,095	0,420	0,614	0,576	0,755	-0,243	-0,070	0,153	1,000

Tableau 9. Matrice des corrélations entre la pression anthropique et la composition du sol.

L'âge moyen des parcelles semble corrélé avec la surface disponible au sein de chaque village (Figure 13).

Cette tendance est confirmée par le test de corrélation de Spearman ($P < 0,0001$, $\alpha = 0,05$). On ne peut donc pas rejeter l'hypothèse nulle d'absence de corrélation, donc la corrélation est significative. Plus la surface en bonnes terres disponibles est importante et plus les agriculteurs cultivent longtemps leurs parcelles.

3.1.4. La composition chimique des sols

La pression anthropique a-t-elle un impact sur les paramètres chimiques du sol ? La matrice des corrélations ci-dessous permet de voir que la pression anthropique a un effet significatif sur tous les paramètres chimiques du sol, phosphore et azote mis à part (Tableau 9).

La matrice et l'ACP1 (Figure 14) reflète le même résultat, à savoir que la pression anthropique est corrélée avec la valeur du pH eau. C'est-à-dire que plus la surface de bonnes terres est importante (anthropisation faible), plus le pH sera élevé. La superficie de bonnes terres est également corrélée avec les trois minéraux que sont le potassium, le calcium et le magnésium. Avec d'autres éléments tels que la matière organique, la capacité d'échange cationique, l'azote total, le sodium et le rapport C/N la corrélation est moins forte.

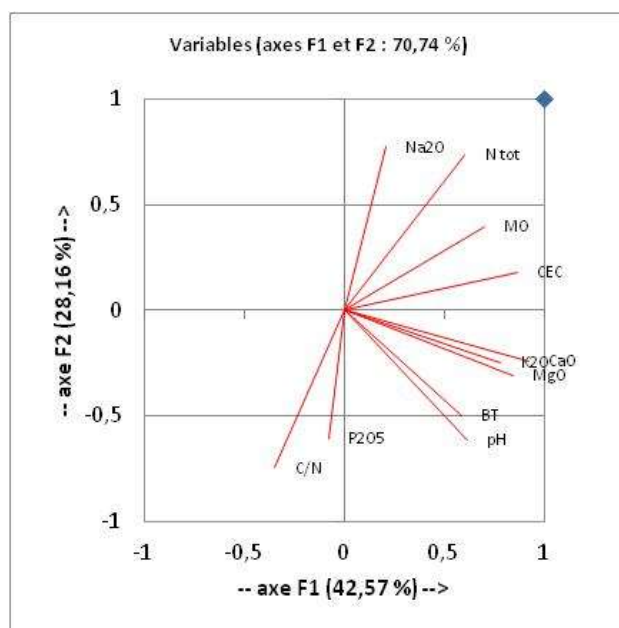


Figure 14. Plan des parcelles dans les deux composantes de l'ACP1.

Les flèches rouges représentent le poids des variables sur chaque axe (MO : matière organique ; CEC : capacité d'échange cationique ; Ntot : azote total ; Na2O : sodium ; CaO : calcium ; Mg : magnésium ; K2O : potassium ; P2O5 : phosphore ; BT : bonnes terres).

Pour tous ces éléments la corrélation est positive. Une faible pression anthropique correspond à une grande superficie de bonnes terres disponibles pour les cultures vivrières. Et plus cette superficie est grande plus ces éléments seront présents en quantité importante, le sodium mis à part.

3.1.5. La durée de jachère

La durée moyenne de jachère tous villages confondus est de 11,80 ans, avec un écart type de 12,39. Parfois il n'y a pas de jachère, tandis que certaines parcelles ont bénéficié de 50 ans de jachère.

La pression anthropique est également corrélée à la durée de jachère d'après le test de corrélation de Spearman ($p < 0,0001$; $\alpha = 0,05$). La moyenne de toutes les durées de jachère en zone de forte pression est 5,1 ans. Tandis qu'en zone de faible pression elle atteint 19,5 ans. Cette différence entre les deux zones est significative d'après le test de Friedman ($p < 0,0001$; $\alpha = 0,05$). Sachant que lorsque la valeur de p est inférieure à 0,05, on rejette l'hypothèse nulle d'absence de différence entre la zone de forte pression et la zone de faible pression.

Plus il y a de grandes surfaces de bonnes terres disponibles, plus les agriculteurs mettent en place de longues jachères (Figure 15).

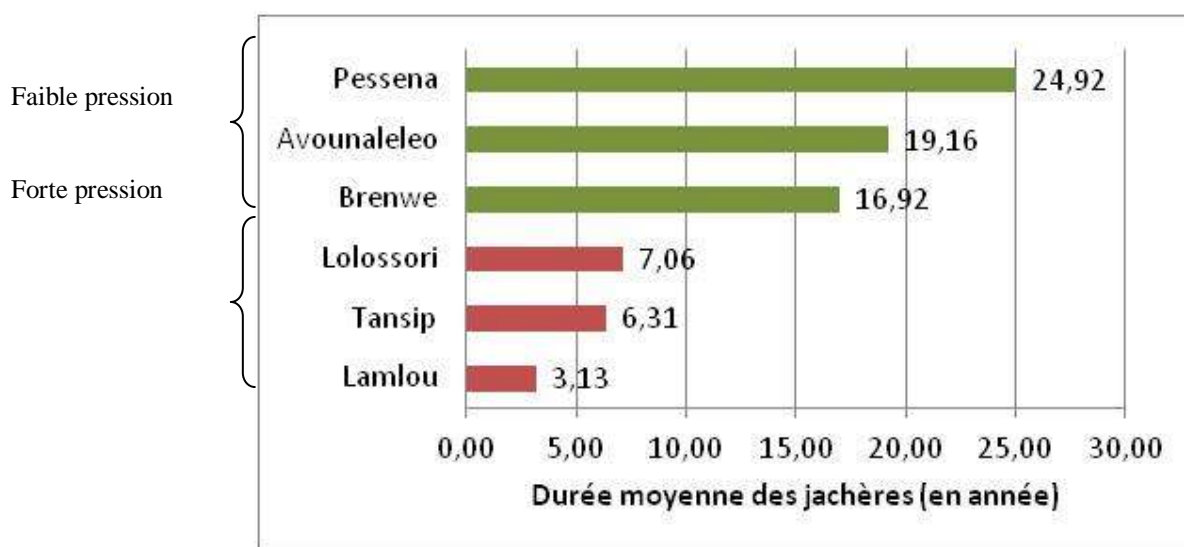


Figure 15. Durées moyennes de jachères en fonction de la surface disponible par foyer.

	Revenu total	Revenu agricole	Bonnes terres
Revenu	1,000	0,805	0,347
Revenu agricole	0,805	1,000	0,326
Bonnes terres	0,347	0,326	1,000

Tableau 10. Matrice des corrélations entre le revenu et la pression anthropique, tous villages confondus

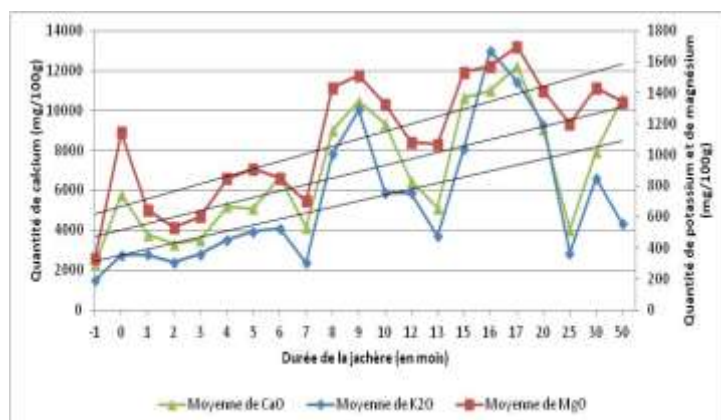


Figure 16. Quantité de minéraux en fonction de la durée de jachère.

	Durée jachère
Durée jachère	1,000
CEC	0,419
MO	0,343
P2O5	0,002
K2O	0,470
MgO	0,708
CaO	0,652
Na2O	-0,162
N tot	0,121
C/N	0,026
pH Eau	0,458

Tableau 11. Matrice des corrélations entre les sols et les durées de jachères.

Les durées de jachères impactent les sols de manière significative, comme le montre le tableau 10. Les teneurs en matière organique, la CEC, le potassium, le magnésium, le calcium et le pH sont élevées si la durée de jachère avant culture de la parcelle est importante (Figure 16). En revanche la corrélation n'est pas significative en ce qui concerne le phosphore, l'azote et le rapport C/N. D'après la matrice des corrélations, le sodium est le seul élément dont la quantité diminue alors que la durée de la jachère augmente.

3.1.6. Les revenus des producteurs

Les revenus dits « agricoles » concernent les ventes de coprah, de kava, de café, de cacao, et de racines et tubercules. La matrice des corrélations suivante (Tableau 11) indique que le revenu total est fortement et significativement corrélé au revenu agricole. La vente de denrées prend donc une part importante dans les revenus totaux des ménages. Le fait d'être dans un village à faible pression (c'est à dire avec plusieurs hectares de terres disponibles par ménage) implique que l'on fera plus de cultures de rente et donc plus de revenus. Il y a juste à Avounaleleo où les revenus perçus par les ménages sont faibles, malgré la grande surface disponible par foyer qui permettrait d'avoir des cultures de rente, et donc d'engendrer des revenus agricoles (Figure 17).

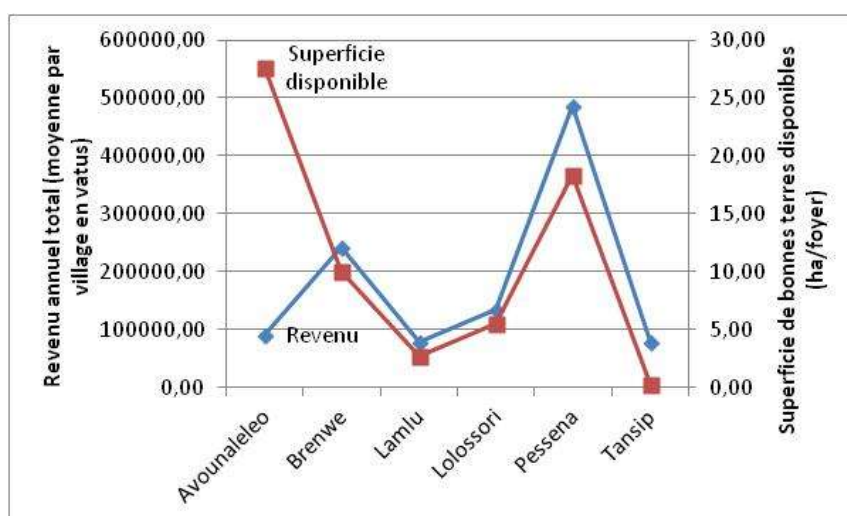


Figure 17. Superficie de bonnes terres disponibles et les revenus annuels des ménages

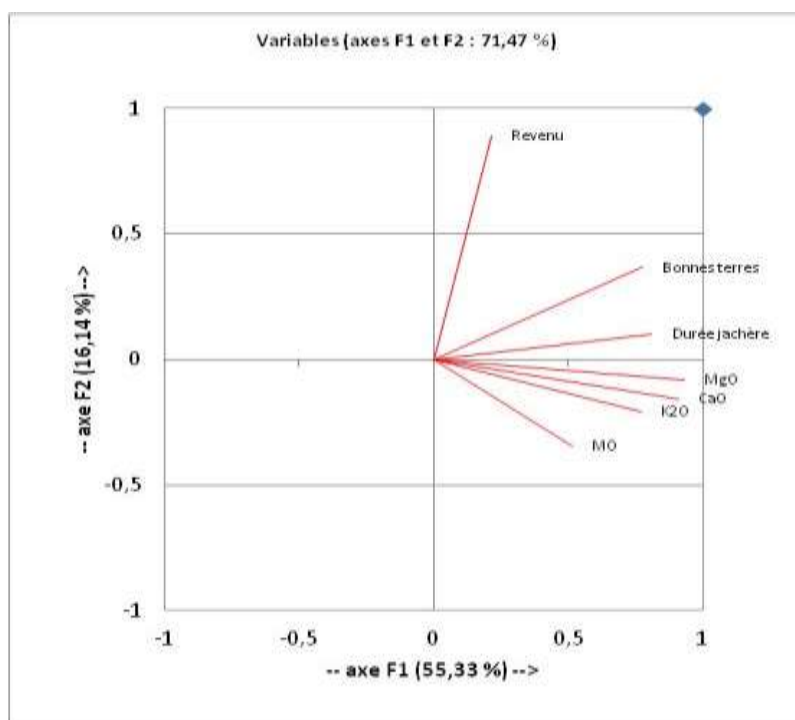


Figure 19. Plan des parcelles dans les deux composantes de l'ACP.

Les flèches rouges représentent le poids des variables sur chaque axe (MO : matière organique ; CaO : calcium ; MgO : magnésium ; K2O : potassium).

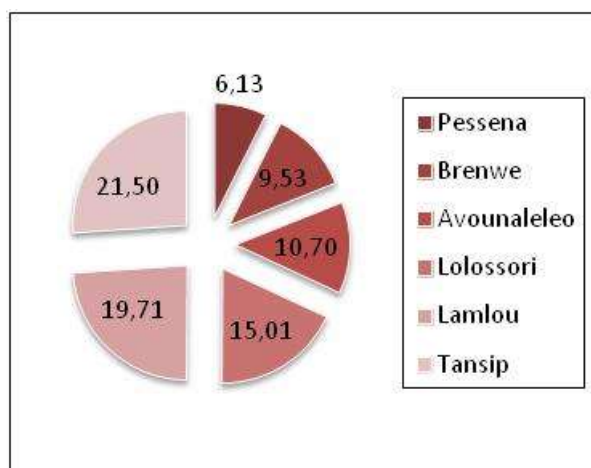


Figure 20. Les rendements moyens des systèmes par village.

* Les groupes ont été obtenus d'après le test de comparaison multiple de Bonferroni en sélectionnant l'ensemble des données

Selon le test de corrélation de Spearman, la corrélation est significative au seuil $\alpha=0,05$ car $p\text{-value}<0,012$. Le même test de corrélation entre les durées de jachères et cette fois les revenus agricoles aboutit à une $p\text{-value}<0,0001$. La corrélation est encore plus significative (Figure 18).

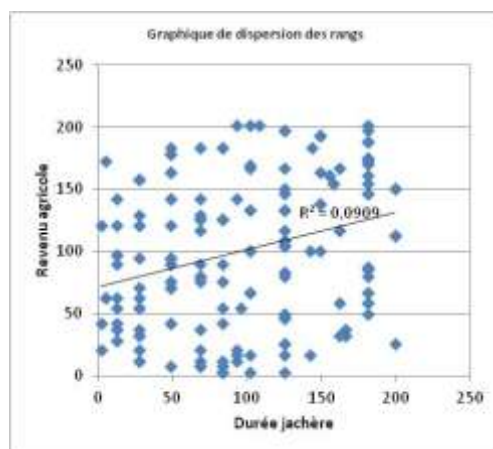


Figure 18. Relation entre les revenus agricoles et les durées de jachères

Cette corrélation indique que plus les revenus agricoles sont importants, plus les jachères sont longues. Cette corrélation n'est pas surprenante, car les jachères sont longues en faibles pressions et que c'est justement en zone de faible pression qu'il y a le plus de revenus agricoles.*

L'ACP2 récapitule les principales corrélations de cette première partie (Figure 19).

Elle représente 71,47% de la variabilité. On voit que le vecteur « durée jachère » est fortement corrélé aux vecteurs représentant les minéraux contenus dans le sol, et également au vecteur « bonnes terres » (c'est à dire au degré d'anthropisation), car l'angle qui les sépare est faible.

Nous avons supposé qu'obtenir des revenus fait chuter les rendements, parce que les agriculteurs ne s'investissent plus autant dans leurs parcelles. L'autre supposition est que ce manque d'investissement se ressent sur la composition chimique des sols. Mais les résultats montrent que les revenus n'impactent pas la composition chimique des sols. Ils semblent juste corrélés positivement avec la superficie de bonnes terres disponibles.

Après la présentation des résultats obtenus, tous villages confondus, il est question de savoir si ces variables (à savoir la surface des parcelles, l'âge des parcelles, la composition chimique du sol de ces parcelles, la durée de la jachère dans le système de culture, et les revenus des ménages) influent sur les rendements des parcelles. Parce que nous supposons que les rendements seront différents en fonction des sites, les résultats seront maintenant déclinés par village.

3.2. Variabilité inter-sites

3.2.1. A chaque village sa performance

Les rendements des systèmes varient du simple au triple selon les villages (Figure 20). Une parcelle vivrière de Pésséna ne produit que 6,13 t/ha/an en moyenne au cours des cinq premières années, contre 21,50 t/ha/an à Tansip.

Villages	Moyenne des rendements des systèmes (t/ha/an)	Ecart type	Groupes *			
Pésséna	6,13	3,27	a			
Brenwé	9,53	3,52		b		
Avounaleleo	10,70	3,66		b		
Lolossori	15,01	4,37			c	
Lamlou	19,71	5,57			c	d
Tansip	21,50	7,23				d
Moyenne	14,35	7,27				

Tableau 12. Rendements moyens par système dans chaque village.

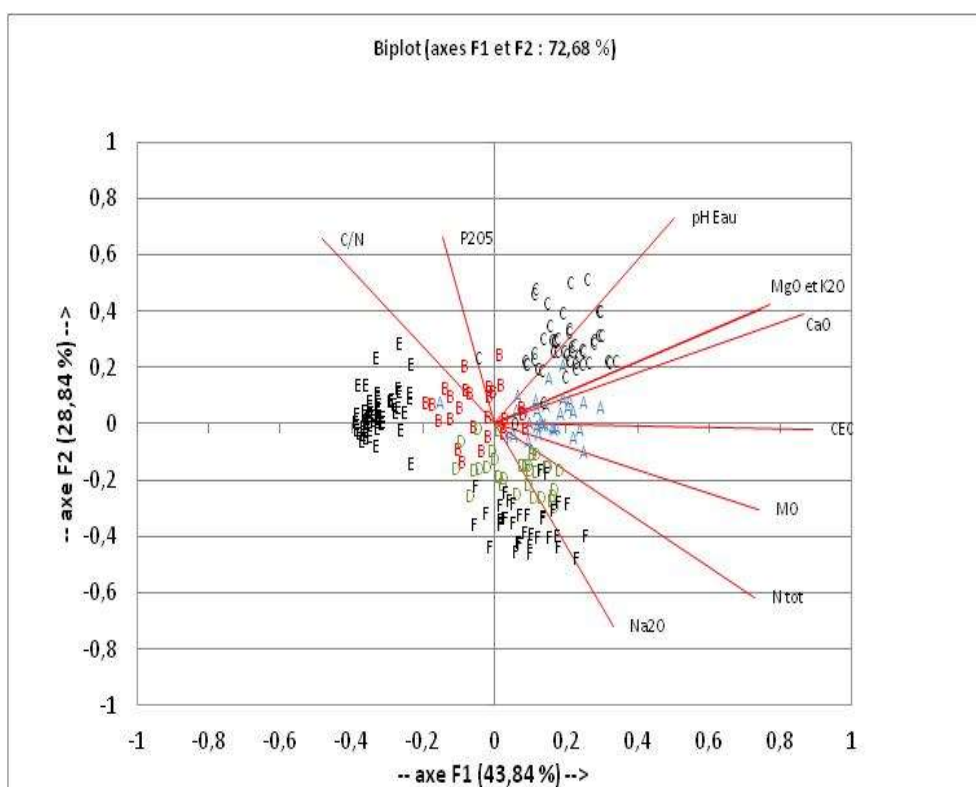


Figure 21. Plan des parcelles dans les deux composantes de l'ACP3.

Les flèches rouges représentent le poids des variables sur chaque axe (MO : matière organique ; CEC : capacité d'échange cationique ; Ntot : azote total ; Na2O : sodium ; CaO : calcium ; Mg : magnésium ; K2O : potassium ; P2O5 : phosphore). Le libellé des parcelles correspond au village où elles se trouvent A : Avounaleleo ; B : Pésséna ; C : Brenwé ; D : Lolossori ; E : Lamlou ; F : Tansip).

Les villages ont des rendements moyens par système différents (Tableau 12).

La différence entre les six villages est significative d'après le test non paramétrique de Friedman ($p < 0,0001$, $\alpha = 0,05$). Trois groupes ont été identifiés comme significativement différents. C'est-à-dire que leurs différences de performances ne sont pas uniquement dues au hasard. Les rendements de Pesséna sont significativement plus faibles que ceux de tous les autres villages. Avounaleleo et Brenwé ont des rendements intermédiaires. Lolossori, Lamlou et Tansip ont des rendements élevés.

Afin de comprendre ces performances différentes nous proposons de nous pencher sur plusieurs facteurs pouvant influencer le rendement. Le postulat de départ est que les rendements dépendent en premier lieu de la composition des sols.

3.2.2. Des conditions spécifiques à chaque village

L'ACP3 a été réalisée à partir de 10 éléments choisis pour caractériser les sols (Figure 21). Les deux axes permettent d'expliquer 72,68% de la variabilité. Le plan des parcelles montre en effet que ces dernières se regroupent par village.

On constate que le magnésium, le potassium et le calcium sont fortement corrélés entre eux de manière positive. En d'autres termes la présence d'un de ces éléments induit la présence des deux autres.

Le pH_{eau} est corrélé positivement à la CEC, et de manière plus forte au magnésium, potassium et au calcium. Cela signifie que plus le pH est élevé plus la capacité d'échange cationique l'est aussi et plus on trouvera ces minéraux dans le sol.

La matière organique est corrélée positivement avec la CEC et l'azote total. Le phosphore, lui, est corrélé négativement avec le sodium, l'azote et la MO. D'après l'ACP3 plus il y a d'azote dans le sol, plus il y a de matières organiques et de sodium, moins on y trouve de phosphore.

Lorsque l'on s'intéresse uniquement à leurs caractéristiques physiques et chimiques des sols des parcelles, ces derniers se regroupent par village. Cela signifie que la variabilité inter-villages des sols est importante, tandis que la variabilité intra-village est moindre. Est-ce que ces différences de composition expliquent les différences de rendement ? On remarque déjà que certains villages disposent de moins d'éléments minéraux que d'autres, comme Lamlou (E) et Pesséna (B).

Nous proposons une caractérisation des sols des six villages.

Villages	Rendements moyens des systèmes (t/ha/an)	pH eau moyens	Groupes*		
Tansip	21,5	5,91	A		
Pésséna	6,13	6,06	A	B	
Lamlou	19,71	6,17	A	B	
Lolossori	15,01	6,2		B	
Avounaleleo	10,7	6,87			C
Brenwé	9,53	7,2			C
Moyenne	13,4	6,4			
Ecart type	6,0	0,5			

Tableau 13. Le pH moyen selon les villages.

* Les groupes ont été obtenus d'après le test de comparaison multiple de Bonferroni en sélectionnant l'ensemble valeurs du pH eau.

Villages	Rendements moyens par an des systèmes	MO	CEC	Azote total	K2O	MgO	P2O5	CaO	Na2O
Pésséna	6,13	10,05	29,02	6037,8	539,92	1443	5,76	6053,28	29,96
Brenwé	9,53	10,26	43,65	7096,15	1371,06	1571,4	70,27	10967,71	32,9
Avounaleleo	10,7	11,44	39,07	8853,5	551,25	1318,3	9,53	10082,41	41,03
Lolossori	15,01	11,21	41,32	9288,42	477,9	1045,6	4,23	5341,45	58,23
Lamlou	19,71	6,77	12,58	4105,49	238,92	369,19	40,94	2640,28	29,92
Tansip	21,5	11,09	37,72	12971,66	461,31	872,83	4,77	4997,54	65,23
Min	6,13	6,77	12,58	4105,49	238,92	369,19	4,23	2640,28	29,92
Max	21,5	11,44	43,65	12971,66	1371,06	1571,4	70,27	10967,71	65,23
Moyenne	13,76	10,14	33,89	8058,84	606,73	1103,39	22,58	6680,45	42,88
Ecart type	6,04	1,74	11,58	3063,31	391,09	441,85	27,27	3202,98	15,32

Tableau 14. Composition moyenne en matière organique et en minéraux des sols par village.

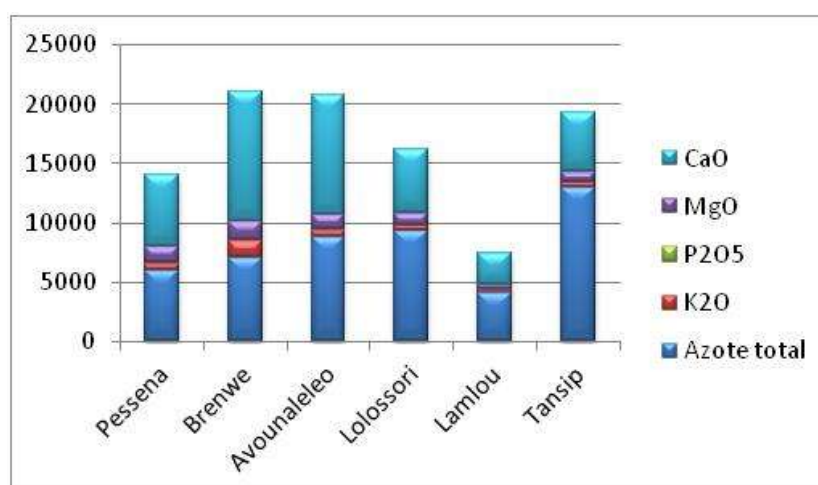


Figure 22. Composition en nutriments des sols des différents villages

Le tableau 13 présente la comparaison des valeurs de pH eau entre les villages. Tansip a un pH eau acide de 5,91, tandis que Brenwé à un pH eau neutre de 7,2. Malgré un écart type de 0,5 entre les villages, 3 groupes sont distingués. Avounaleleo et Brenwé sont significativement différents des quatre autres villages. Et Tansip et Lolossori appartiennent également à différents groupes. Il n'y a que Pésséna et Lamlou qui ne soient pas significativement différents en termes de valeur du pH eau.

Les sols des villages étant chimiquement différents selon les villages étudiés, nous nous attendons à des rendements différents entre villages. Le tableau 14 présente les quantités moyennes de matière organique et de nutriments contenus dans les sols des six villages. Les écarts types entre villages sont importants.

Avounaleleo est le village où il y a en moyenne plus de matière organique que dans les autres villages. Mais le faible écart type indique que les teneurs en matières organiques ne sont pas très différentes selon les villages. Seul Lamlou en a 4% de moins que les autres villages. De manière générale Lamlou est le village qui contient le moins de matière organique, d'azote, de potassium, de magnésium, de calcium et de sodium. Les sols de Lamlou semblent plus appauvris que ceux des autres villages.

Brenwé est le village le plus pourvu en magnésium, phosphore, en calcium, en potassium, tandis que Tansip réuni le plus d'azote et de sodium.

Malgré une quantité de nutriments importante dans les sols de Brenwé, ce village atteint des rendements intermédiaires de 9,53 t/ha/an. A l'inverse Lamlou, qui fait parti du groupe de villages à hauts rendements, est le village le moins pourvu en matière organique, en azote, en potasse, en magnésium, en calcium et en sodium.

Ces faibles niveaux peuvent correspondre à un épuisement progressif résultant d'une réduction constante de la durée de jachère.

La figure 22 montre que dans un kilogramme de terre de Lamlou il y a deux fois moins de nutriments que dans les autres villages. Sur les trois minéraux essentiels que sont l'azote, le potassium et le phosphore, seul l'azote est présent en quantité importante. Le potassium est plus présent que le phosphore, dont les teneurs sont très faibles.

Le calcium, élément minéral secondaire pour les plantes, est présent en quantité importante dans tous les sols.

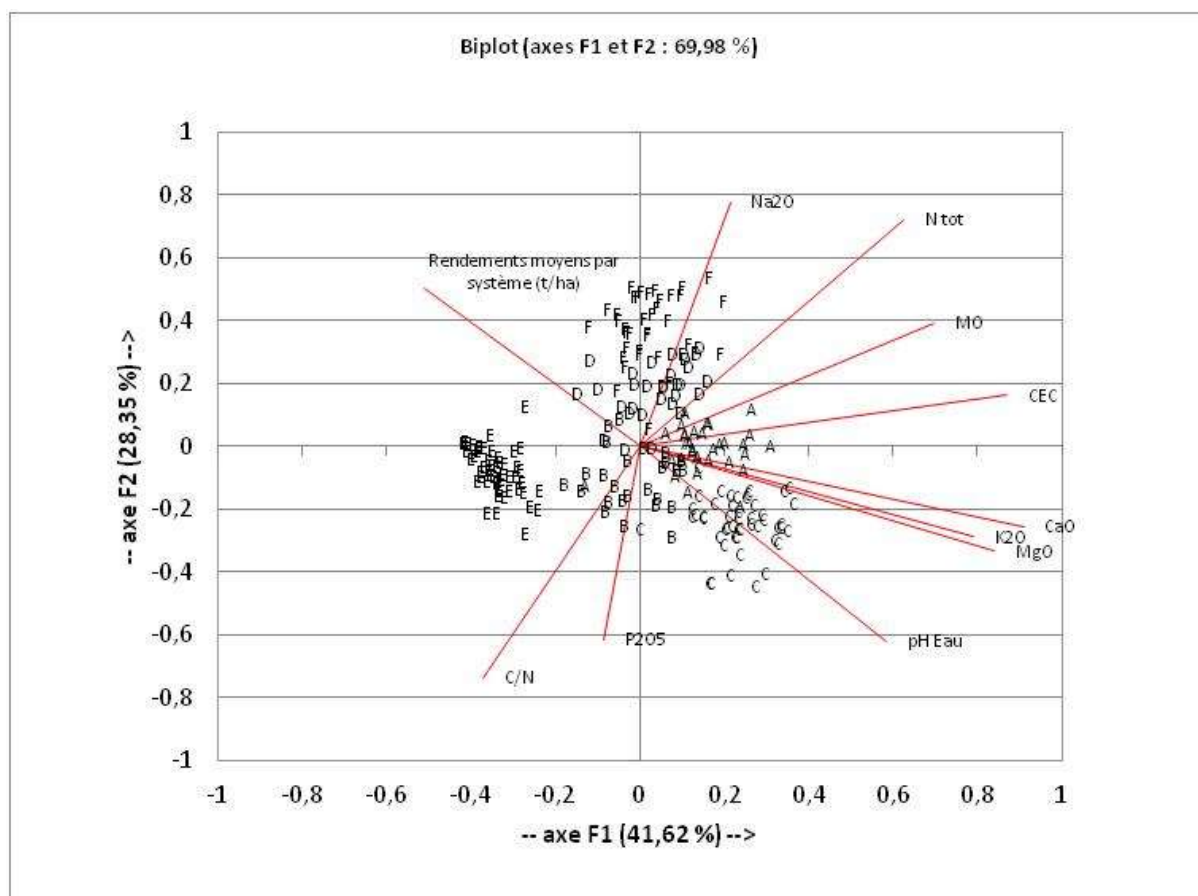


Figure 23 Plan des parcelles dans les deux composantes de l'ACP4.

	Rdtparcelle	CEC	MO	P2O5	K2O	MgO	CaO	Na2O	N tot	C/N	pH
Rdtparcelle	1,000	-0,190	-0,124	0,080	-0,245	-0,352	-0,283	0,148	0,035	-0,120	-0,258
CEC	-0,190	1,000	0,627	-0,094	0,608	0,627	0,749	0,347	0,614	-0,397	0,447
MO	-0,124	0,627	1,000	-0,256	0,347	0,443	0,520	0,382	0,761	-0,343	0,095
P2O5	0,080	-0,094	-0,256	1,000	0,115	-0,006	0,109	-0,428	-0,371	0,344	0,420
K2O	-0,245	0,608	0,347	0,115	1,000	0,754	0,711	-0,012	0,282	-0,121	0,614
MgO	-0,352	0,627	0,443	-0,006	0,754	1,000	0,827	-0,088	0,258	-0,026	0,576
CaO	-0,283	0,749	0,520	0,109	0,711	0,827	1,000	0,030	0,389	-0,170	0,755
Na2O	0,148	0,347	0,382	-0,428	-0,012	-0,088	0,030	1,000	0,604	-0,533	-0,243
N tot	0,035	0,614	0,761	-0,371	0,282	0,258	0,389	0,604	1,000	-0,828	-0,070
C/N	-0,120	-0,397	-0,343	0,344	-0,121	-0,026	-0,170	-0,533	-0,828	1,000	0,153
pH	-0,258	0,447	0,095	0,420	0,614	0,576	0,755	-0,243	-0,070	0,153	1,000

Tableau 15. Matrice des corrélations, obtenue à partir de l'ensemble des données, et non pas des moyennes.

L'hypothèse selon laquelle la richesse chimique des sols détermine directement les rendements ne semble pas vérifiée, dans la mesure où Lamlou a des rendements élevés malgré une composition relativement pauvre.

Une quatrième ACP incluant les rendements (Figure 23) confirme cette tendance. L'ACP4 permet d'expliquer 69,98%. On perd de la lisibilité par rapport à l'ACP3 (qui permettait d'expliquer 72,68% de la variabilité). On voit que les rendements sont corrélés négativement à la plupart des variables.

Cela signifie que plus les rendements sont élevés moins il y a de nutriments dans le sol. Il y a également une corrélation négative entre le rendement et la matière organique. Ces observations sont très surprenantes dans la mesure où on s'attendait exactement à l'inverse.

La corrélation la plus marquée est entre les rendements et le pH eau. Elle indique que lorsque les rendements sont élevés le pH est faible. D'après le test de corrélation de Spearman, on obtient p-value $< 0,0001$ au seuil de signification $\alpha = 0,05$. On peut donc rejeter l'hypothèse nulle d'absence de corrélation. En d'autre terme la corrélation négative entre les rendements et le pH n'est pas du au hasard.

En revanche le tableau 15 confirme la faible corrélation entre le rendement et la matière organique (0,124) l'azote total (0,035), le rapport C/N (0,120), le phosphore (0,080). De manière générale la valeur des coefficients de corrélations entre les éléments qui composent le sol et le rendement ne dépasse pas 0,352.

Lorsque les valeurs sont en gras, cela veut dire que la corrélation est significative. C'est-à-dire que l'on a moins de 5% de risque de se tromper en affirmant ces corrélations. C'est pour cela que l'on ne peut pas affirmer qu'il y ait une corrélation entre les rendements moyens des parcelles et la quantité d'azote total, de phosphore, de matière organique et également avec le rapport C/N.

L'impact de la composition des sols sur le rendement, ou du rendement sur cette composition, est faiblement significatif. Cela signifie que d'autres éléments ont un effet sur le rendement. Le postulat de départ étant que la pression anthropique joue un rôle prépondérant dans les systèmes de cultures, cette hypothèse doit être vérifiée.

.

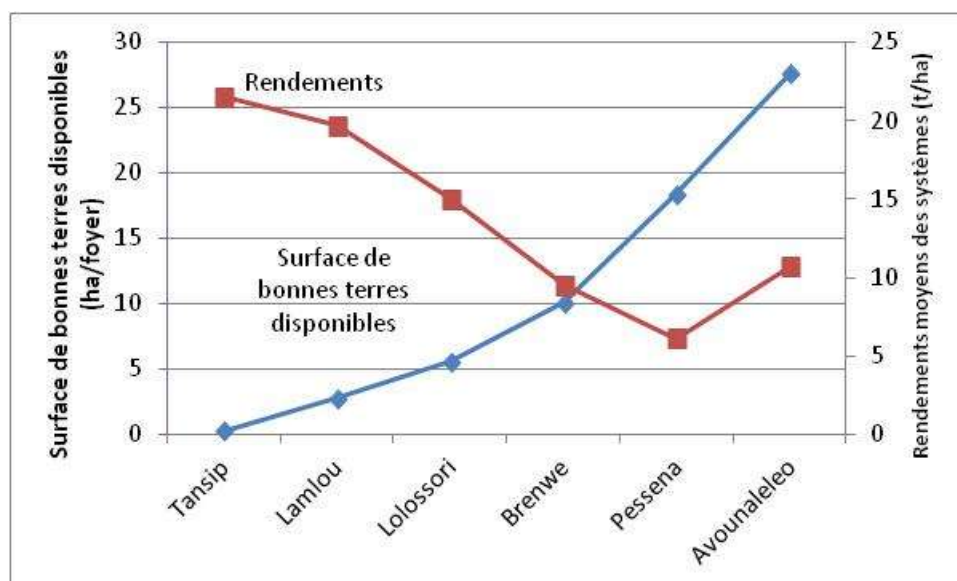


Figure 24. Moyenne des rendements des systèmes par village suivant la surface de bonnes terres disponibles.

3.2.3. Pression anthropique et rendements

La Figure 24 nous montre que lorsque la pression anthropique est forte les rendements sont élevés. Par exemple à Tansip, village où les ménages disposent de 0,3 ha de terres pour cultiver leurs parcelles vivrières, les rendements sont les plus importants observés par l'étude : 21,5 t/ha/an. Plus la surface disponible se réduit, plus l'agriculture s'intensifie. Avounaleleo échappe à cette tendance. Ce village dispose de 27,6 hectares par foyer, mais les rendements de 9,53 t/ha/an dépassent ceux de Pésséna de 6,13 t/ha/an qui compte pourtant moins de terres disponibles (18,4 ha/foyer).

Le test de corrélation de Spearman confirme la tendance visuelle qui se dégage de la Figure 24. Il y a en effet une corrélation significative entre les bonnes terres disponibles et les rendements des systèmes ($p\text{-value} < 0,0001$, $\alpha = 0,05$). La valeur de p indique que l'on a moins de 1% de chance de se tromper si l'on affirme que la surface disponible et les rendements sont corrélés.

On peut voir que les rendements des parcelles sont corrélés avec les temps de jachères. Cette corrélation est négative. Les parcelles ayant subi de longues jachères auront des rendements faibles, tandis que ceux avec de courtes jachères, notamment les parcelles en zone de forte pression, auront des rendements élevés (Figure 25).

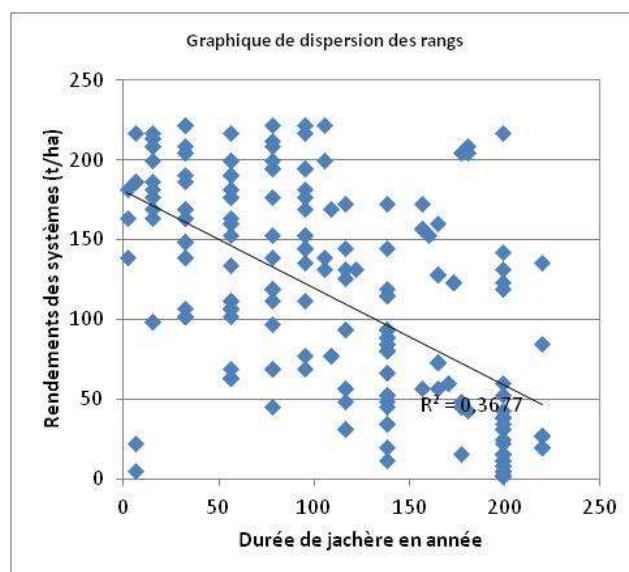


Figure 25. Corrélation entre le rendement et la durée de jachère.

Villages	Nombres de parcelles	Bonnes terres disponibles par foyers (ha)	Rendements moyens des systèmes	Revenus annuels moyens (vatus/ménage)
Tansip	35	0,3	21,5	149 561
Lamlou	53	2,8	19,71	212 400
Lolossori	31	5,6	15,01	195 598
Brenwé	48	10,1	10,7	236 247
Pésséna	25	18,4	6,13	451 050
Avounalele	32	27,6	9,53	212 877
Moyenne	37,33	10,80	13,76	242955,50
Ecart type	10,82	10,41	6,04	105973,53

Tableau 16. Tableau des revenus des agriculteurs et des rendements des systèmes.

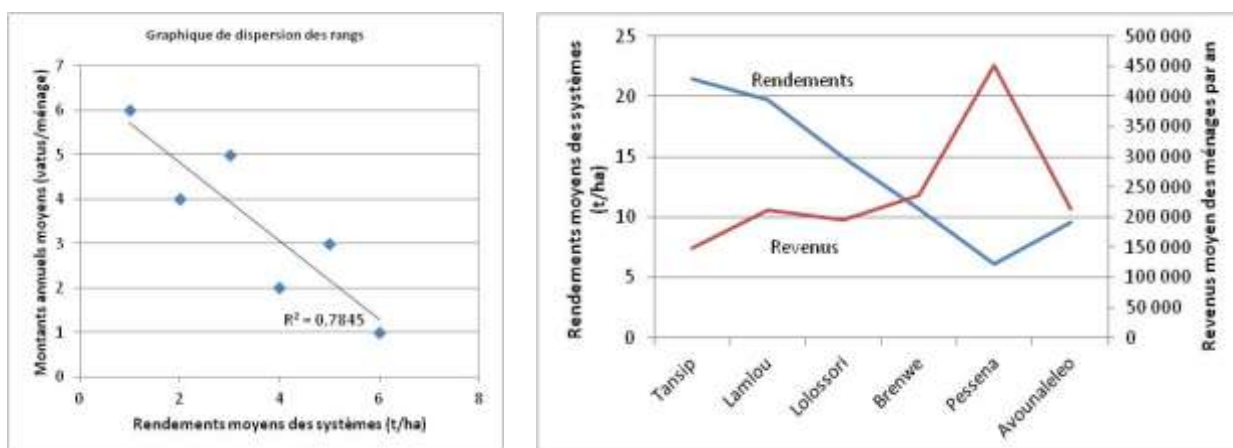
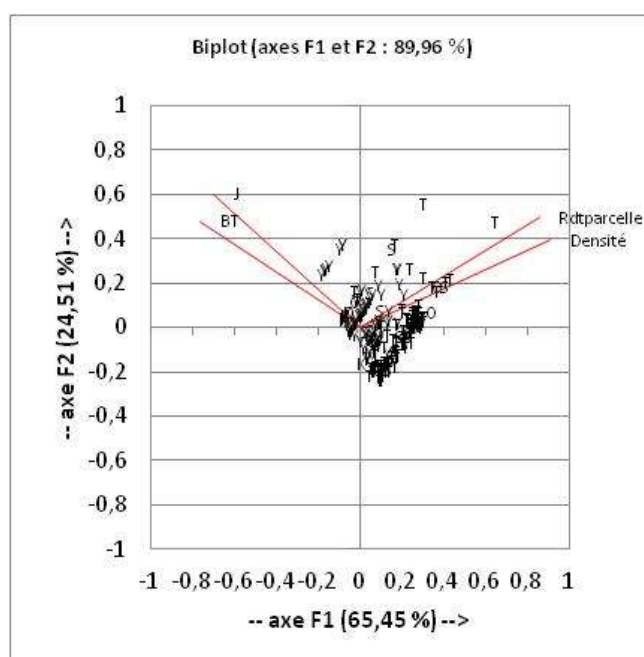


Figure 26. Corrélation entre les rendements moyens et les revenus moyens par ménages de chaque village

Figure 28. Plan des parcelles dans les deux composantes de l'ACP5.

Les flèches rouges représentent le poids des variables sur chaque axe (BT : bonnes terres, J : durée de jachère, Rdtparcelle : rendement des parcelles).

Le libellé des parcelles correspond à la culture de tête d'assolement (K : kava, T : taro, Y : igname, S : jardin de soudure, O : autres cultures).



3.2.4. Les revenus : cause d'abandon des parcelles ?

La moyenne des revenus des agriculteurs varie en fonction des villages (Tableau 16). Les aspects économiques peuvent également influencer les rendements (Figure 26). La corrélation entre les revenus totaux des ménages et les rendements moyens des systèmes de cultures observés est significative selon le test de Spearman ($p\text{-value} < 0,0001$, $\alpha = 0,05$).

Les ménages qui gagnent beaucoup d'argent ont mis en place des systèmes à faible rendements. Plus les revenus sont importants moins les parcelles sont productives à l'hectare.

3.2.5. La densité de plantes dans les parcelles

Les villages sont significativement différents en termes de densité, d'après le test de Friedman ($p < 0,0001$; $\alpha = 0,05$) (Figure 27). La correction de Bonferroni nous montre ces groupes. Tansip et Lamlou se détachent des autres villages. Lolossori, Brenwé et Tansip forment un groupe intermédiaire et enfin Pésséna est le seul village significativement différent de ce groupe intermédiaire (Tableau 17).

	Groupes		
Pésséna	A		
Avounaleleo	A	B	
Brenwé	A	B	
Lolossori		B	C
Tansip			C
Lamlou			C

Tableau 17. Densité moyenne par village..

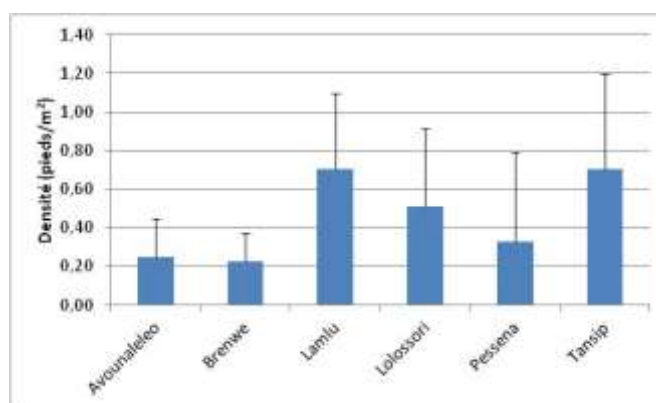


Figure 27. Densité moyenne des plantes par village.

3.2.6. La culture de tête d'assolement

L'ACP5 représente 89,96% de la variabilité (Figure 28). On voit qu'aucun type de parcelle ne se détache des autres d'après les durées de jachères observées, la pression anthropique, l'espacement entre les pieds et les rendements des parcelles. Certaines parcelles d'igname bénéficient d'une longue jachère.

Nous proposons de nous intéresser à l'évolution des rendements dans le temps.

Villages	Nb	Année 1	Nb	Année 2	Nb	Année 3	Nb	Année 4	Nb	Année 5	Moyenne	Ecart type
Pésséna	13	15,08	4	14,55					8	2,03	10,55	0,38
Brenwé	13	12,27	11	13,04	12	11,69	12	9,78			11,70	0,54
Avounaleleo	5	16,40	7	11,14	7	10,19	8	10,10	5	13,91	12,35	3,72
Lolossori	10	19,80	10	18,86	4	16,20	7	4,78			14,91	0,66
Lamlou	22	23,95	13	20,26	9	18,55	9	11,44			18,55	2,61
Tansip	20	26,85	11	18,81	4	13,54					19,73	5,68
Moyenne	83	19,06	56	16,11	36	14,04	36	9,02	13	7,97	13,24	2,08
Ecart type		5,55		3,70		3,38		2,92		8,40		

Tableau 18. Rendements moyens par village et par an.

Année de culture	Rendement moyen des parcelles (en t/ha/an)	Groupes*
Année 5	7,97	A
Année 4	9,02	A
Année 3	14,04	B
Année 2	16,11	B C
Année 1	19,06	C

Tableau 19. Table des groupes selon les rendements moyens des parcelles au cours du temps.

*Les groupes ont été obtenus d'après le test de comparaison multiple de Bonferroni en sélectionnant l'ensemble valeurs du pH eau.

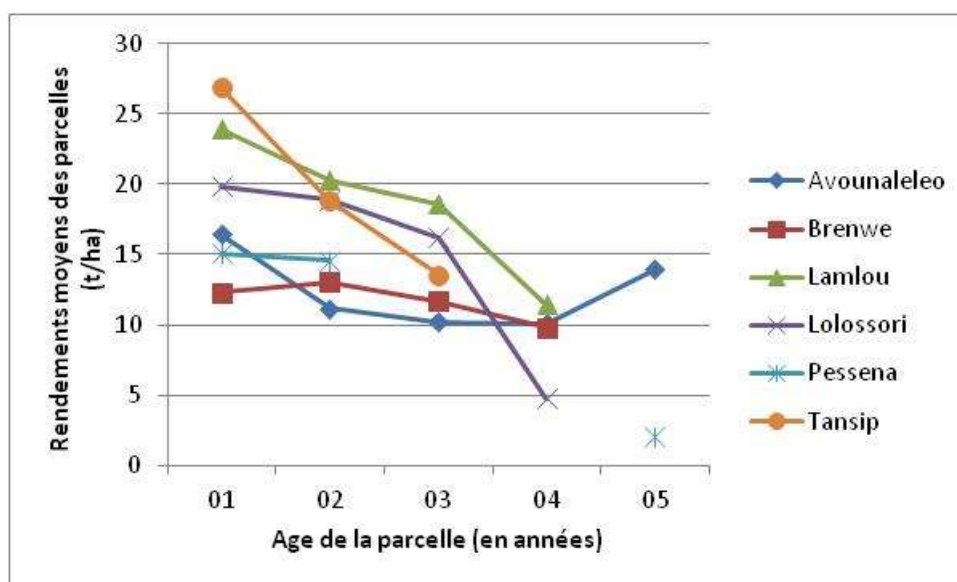


Figure 29. La dynamique des rendements moyens par parcelle

3.3. Variabilité intra-sites

3.3.1. Des rendements décroissants au cours du temps

Afin de vérifier l'hypothèse selon laquelle les rendements sont décroissants au cours du temps, les années des parcelles ont été établies à partir de leur âge en mois (Tableau 18). Ainsi les parcelles notées en année 5 correspondent à cinq ans et plus.

La première année les rendements vont du simple au double. Tansip a des rendements atteignant 26,85 t/ha, tandis que les rendements de Brenwé et Pesséna oscillent entre 12 et 15 t/ha.

On voit que les rendements diminuent au cours du temps et ce dans chaque village. La première année les rendements des six villages confondus atteignent 19,06 t/ha, et ils vont décroissants chaque année jusqu'à atteindre un minimum de 7,97 t/ha en cinquième année.

La dynamique au sein de chaque village est la même. Si ce n'est qu'à Avounaleleo, où 5 parcelles identifiées comme des parcelles de 5ème année ont un rendement moyen de 13,91 t/ha (ce qui est presque égal au rendement de première année : 16,40 t/ha).

Cette diminution des rendements est-elle significative ? La table des groupes montre qu'il n'y pas de différence significative entre l'année 1 et l'année 2, ni entre l'année 2 et l'année 3 (Tableau 19). En revanche les années 4 et 5 son significativement différentes des autres.

Au cours du cycle de culture les rendements sont décroissants, mis à part à Avounaleleo (Figure 29). La dynamique n'est pas la même au sein de chaque village. Par exemple à Tansip, Lamlou, et Lolossori les rendements de troisième année sont deux fois moins importants que ceux de première année, alors qu'à Brenwé ou à Avounaleleo il n'y a pas de diminution drastique des rendements.

Comment expliquer ces rendements décroissants ? L'appauvrissement des sols au cours du temps pourrait être la cause de cette chute des rendements.

3.3.2. Evolution de la densité de plantes dans les parcelles au cours du temps

La densité diminue au cours du cycle de culture (Figure 30 et 31). Mis à part Lamlou qui à une densité moyenne de 0,88 pieds/m² en cinquième année, tous les autres villages ont un nombre de pieds moindre sur les parcelles.

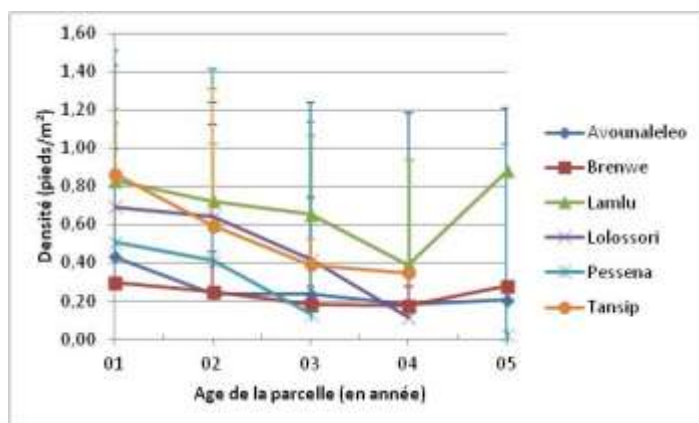


Figure 30. Moyennes de la densité sur les parcelles de chaque village

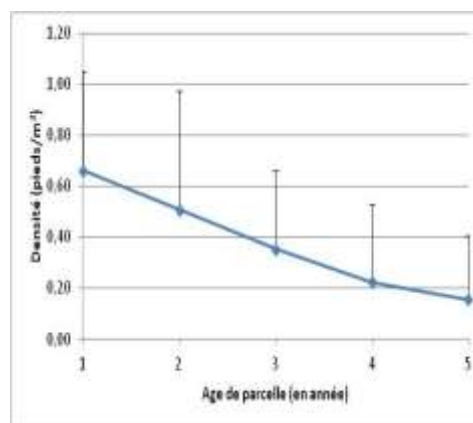


Figure 31. Moyenne des densités sur les parcelles tous villages confondus

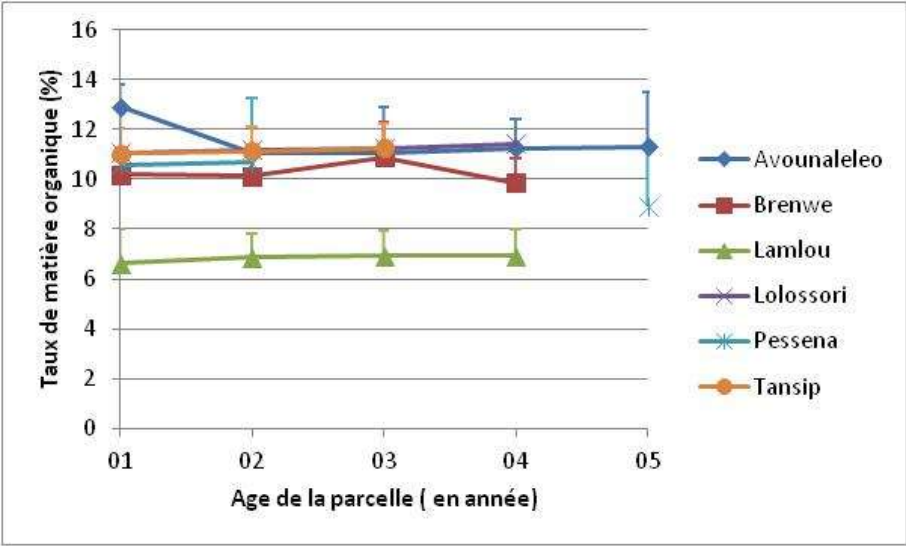
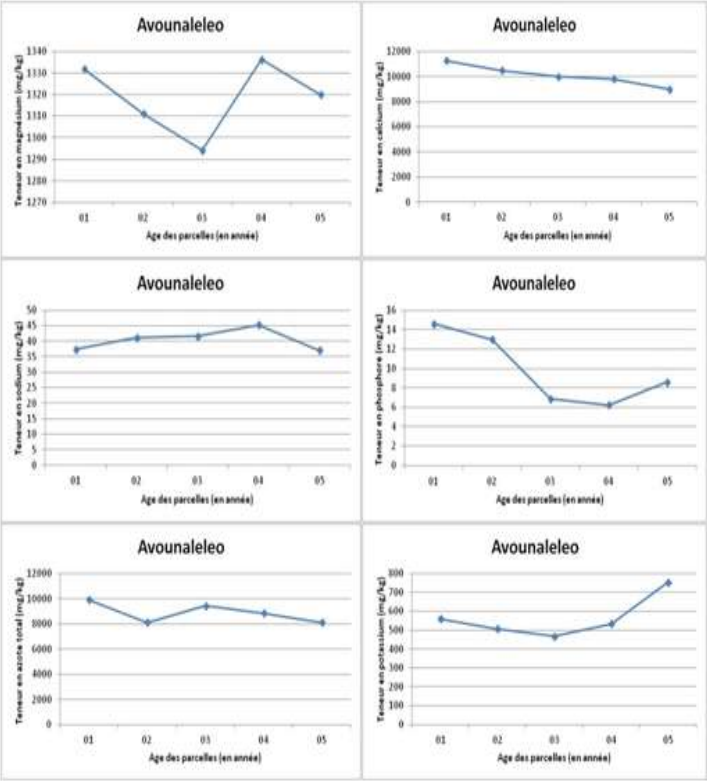


Figure 32. Quantité de matière organique en fonction du temps.



	Age en mois
CEC	0,204
MO	0,058
P2O5	-0,021
K2O	0,246
MgO	0,278
CaO	0,290
Na2O	-0,025
N tot	-0,001
C/N	0,069
pH Eau	0,332

Figure 33. Evolutions des teneurs des six minéraux principaux dans les sols d'Avounaleleo.
Tableau 20. Matrice des corrélations entre l'âge des parcelles et leur composition chimique.

Malgré des écarts types importants au sein de chaque village, la tendance globale est nette. Plus l'âge de la parcelle est avancé moins l'agriculteur plante de pieds.

3.3.3. Evolution de la composition chimique des sols au cours du temps

La matière organique apparaît comme relativement stable (Figure 32). Cette tendance est confirmée par le test de Mann-Whitney qui indique une p-value $> 0,05$ entre chaque année, au seuil $\alpha=0,05$. Comme le p-value est supérieur au seuil, la différence entre les moyennes de deux années consécutives n'est pas significative. Les moyennes par village nous montrent peu de variation en cours du temps et entre les villages, si ce n'est Lamlou qui est significativement différent des autres villages d'après le test de Friedman (p-value $< 0,0001$, $\alpha=0,05$).

La quantité des autres éléments minéraux du sols est également stable au cours du cycle de culture (Annexe 2).

Le cas d'Avounaleleo est révélateur du faible impact des cultures sur les sols. La série de graphiques et la matrice des corrélations montrent que, aussi bien à Avounaleleo que dans tous les autres villages, l'âge des parcelles n'influence pas significativement la composition chimique du sol (Tableau 20 et Figure 33).

Les seules corrélations significatives concernent les teneurs en potassium, en magnésium et en calcium. Ces éléments sont présents en plus grande quantité lorsque l'âge de la parcelle est élevé.

L'ACP6 permet d'expliquer 67,32 % de la variabilité. La variable « âge » n'est pas bien représentée par rapport aux autres variables.

En effet, l'analyse en composante principale, permet de constater que l'âge des parcelles est corrélé avec les teneurs en magnésium, potassium et calcium (Figure 34). La corrélation est moins forte avec le phosphore, la capacité d'échange cationique et la matière organique. Autrement dit les sols des parcelles cultivées depuis longtemps contiennent plus de minéraux.

On peut remarquer également que le pH est corrélé à l'âge des parcelles. Quand l'âge des parcelles est élevé, le pH augmente. C'est donc une tendance contraire à l'acidification. On voit que plus le pH est élevé plus il y a de phosphore, de calcium, de potassium et de magnésium dans le sol.

L'ACP6 indique également que la variable « âge » est indépendante de la variable « azote » car l'angle entre les deux vecteurs est environ 90° . Cela signifie que l'âge de la parcelle n'influence pas les teneurs en azote du sol.

Le nombre d'années de cultures n'impacte que faiblement la composition du sol. Or l'ACP6 montre que les rendements sont corrélés négativement à l'âge des parcelles. Autrement dit plus l'âge de la parcelle est élevé moins les rendements sont importants, mais ceci n'est pas imputable à la composition du sol.

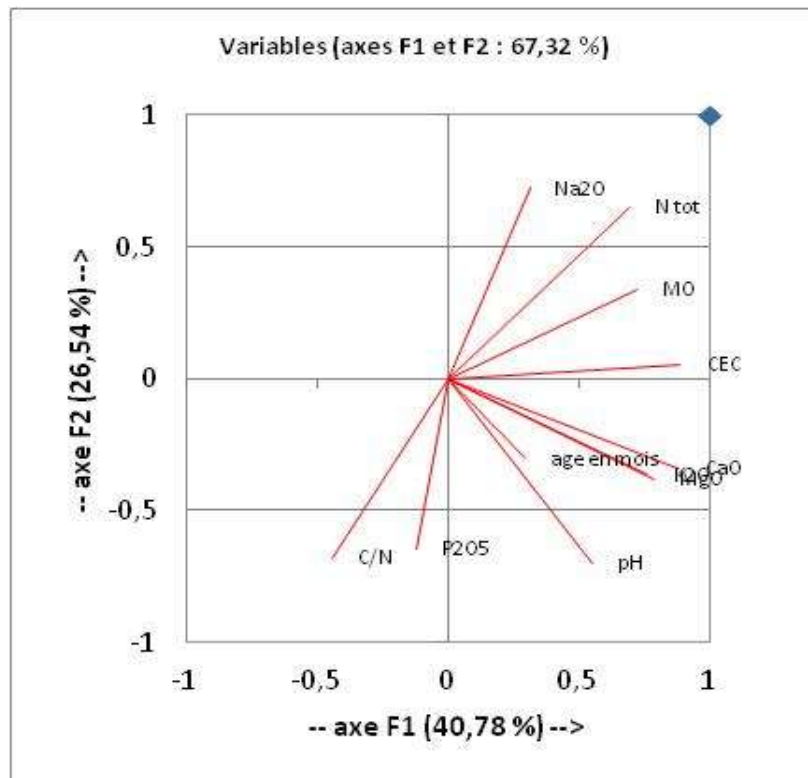


Figure 34. ACP6 : représentation des variables dans le cercle des corrélations

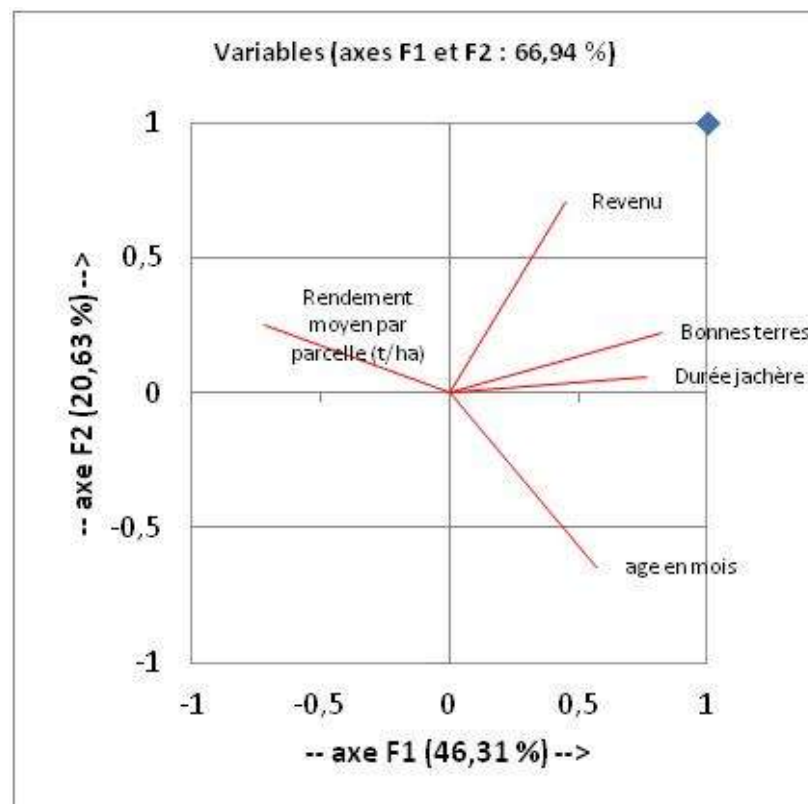


Figure 35. ACP7 : représentation des variables dans le cercle des corrélations

3.3.4. Les rendements à travers leurs contraintes

Mettre en relation l'âge avec les variables telles que le revenu, la pression anthropique et la durée de jachère permet de voir ce qui, du temps ou du contexte, impacte le plus les rendements (Figure 35). Cette ACP7 permet de lire 66,94% de la variabilité, sans les teneurs en minéraux. On peut voir que les revenus ne sont quasiment pas corrélés avec les rendements. La pression anthropique est corrélée négativement aux rendements. Lorsqu'il n'y a pas beaucoup de terres disponibles, les rendements sont élevés. Ce qui a priori, peut paraître très surprenant. Selon l'angle des deux vecteurs, les rendements par parcelle sont fortement corrélés à l'âge de la parcelle, plus qu'à toute autre variable.

3.5. Valeurs nutritionnelles

3.5.1. Comparaison entre les tubercules et les céréales

Les céréales ont une teneur en matière sèche beaucoup plus importante que les racines et tubercules. Alors que les racines et tubercules n'ont jamais plus de 40% de matière sèche à la sortie du champ, les deux céréales qui sont le riz et le blé ont plus de 80% (Figure 36).

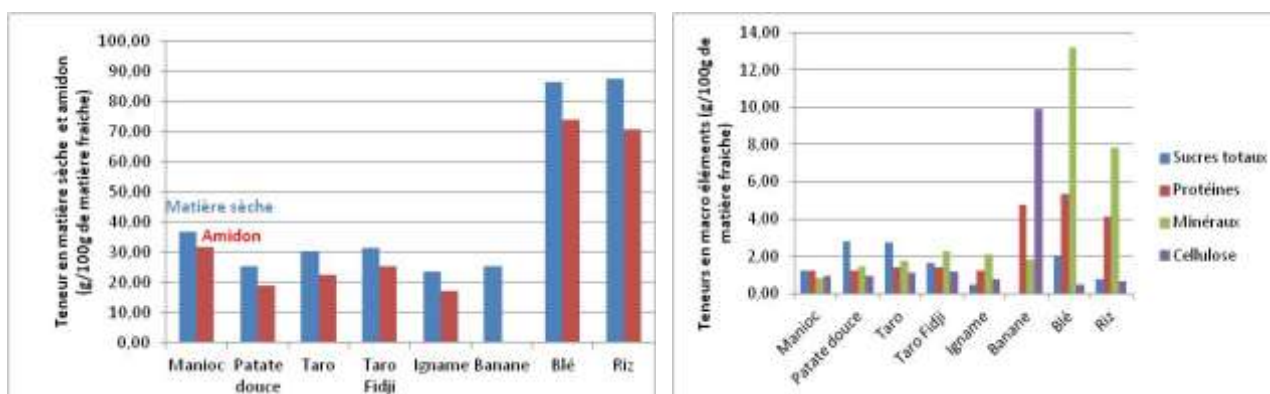


Figure 36. Comparaison des teneurs en macro-éléments entre les racines, tubercules et deux céréales. La teneur en amidon et en sucre de la banane changent en fonction du stade de maturité. La comparaison avec les céréales et racines et tubercules n'est pas pertinente.

Les céréales fournissent également plus de protéines et de minéraux que les plantes amylacées des systèmes végétaux.

3.5.2. Rendement en macro-éléments des systèmes végétaux

Ces faibles teneurs en macro éléments se ressentent sur les rendements en macroéléments des systèmes végétaux. Les deux schémas qui suivent montrent la prépondérance de l'amidon par rapport aux autres éléments (Figure 37). L'amidon est produit en moyenne à hauteur de 2,5 t/ha/an à l'échelle d'un système. C'est-à-dire que d'une parcelle que l'agriculteur aura défrichée et cultivée pendant 5 ans, il en aura retiré à la fin 10 t/ha d'amidon (cinq fois 2,5 car le système est sur cinq ans). De même après cinq années de culture le système aura fournis en moyenne 210 kilogrammes de minéraux et de sucre par hectare, 230 kilogrammes de fibres, 270 kilogrammes de protéines.

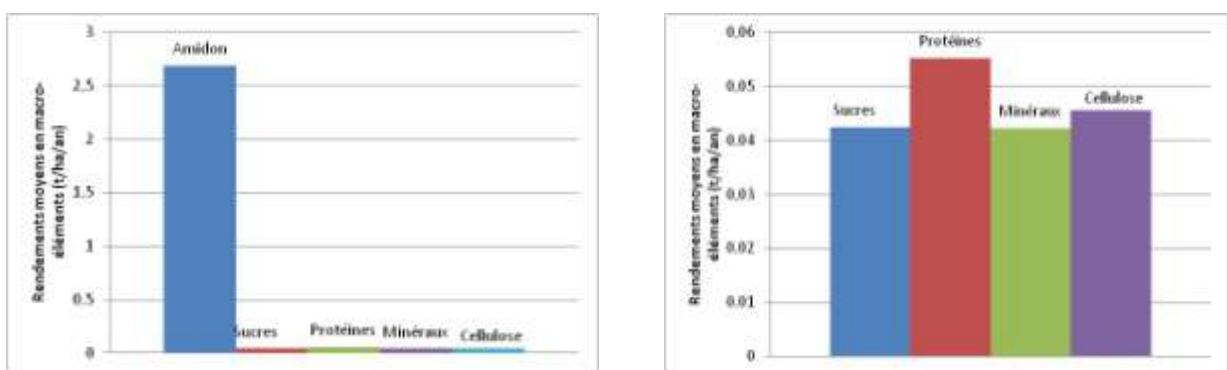


Figure 37. Comparaison entre les apports recommandés et les rendements moyens des systèmes en kJ par village.

3.5.3. Apports caloriques

D'après les apports énergétiques moyens de chaque espèce (Tableau 21). La moyenne des apports énergétiques de tous les systèmes est de $4,1 \cdot 10^6$ KJ produit par an. Si l'on considère que les apports recommandés sont de 2200 kJ par jour (Anses, 2012), soit 3,36. 106 kJ par an, les parcelles du Vanoutou couvrent ces besoins seulement avec les espèces amylacées (Figure 38).

	Apport calorique (kJ/100g)
Manihot	594,28
Ipomoea	447,31
Colocasia	441,16
Xanthosoma	546,83
Dioscorea	382,36
Musa	490,71

Tableau 21. Apport calorique des racines et tubercules frais.

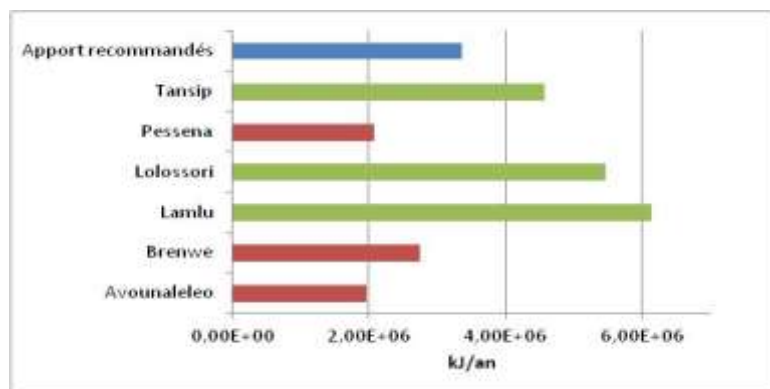


Figure 38. Rendement en macro-éléments des systèmes végétales. Les teneurs en macro-éléments et leurs sources sont disponibles en Annexe 3.

Le tableau 22 est une estimation des rendements en amidon, protéines et minéraux des racines et tubercules et des céréales. D'après les rendements moyens mondiaux et les teneurs moyennes en macro-éléments (Annexe 3), les racines et tubercules produisent plus de matières sèches, d'amidon et de protéines à l'hectare.

	Rendement moyen de matière fraîche (t/ha)	Rendement moyen de matière sèche (t/ha)	Rendement en amidon (t/ha)	Rendement en protéines (t/ha)	Rendement en minéraux (t/ha)
Riz	4,30	3,77	2,67	0,15	0,29
Blé	3,00	2,60	1,92	0,14	0,34
Racines et tubercules	13,89	4,29	3,38	0,23	0,15

Tableau 22. Comparaison des rendements de macro-éléments des céréales et des racines et tubercules. Les rendements de matières fraîches proviennent de FAOSTATS, 2012 et les rendements de macro-éléments ont été calculés à partir des sources en Annexe 3.

4. Discussion

4.1. Variables structurelles

La taille moyenne de toutes les parcelles est de 545 m². avec un écart-type de 570,5. En effet, les parcelles sont de tailles très variables, avec un minimum de 42 m² et un maximum de 4772 m². Lors de son étude en 2003, Morelli avait observé des parcelles variant de 200 à 800m². Dans l'Atlas du Vanouatou, les parcelles dénombrées sont de taille comprise entre 500m² et 1500m² (Siméoni, 2009).

Les éclaircies pratiquées dans la forêt lors de la création de parcelles sont toujours petites. Il en est de même aux îles Salomon, où les parcelles sont en moyenne de 759m² (Mertz, 2012). Les parcelles de petites tailles sont donc entourées de forêt secondaire proche, ce qui contribue à la protection des sols et l'écosystème forestier peut plus facilement se régénérer après culture (Carrière, 2003 ; Siméoni, 2009). D'ailleurs, lorsque les agriculteurs décident d'augmenter les quantités produites, ils n'augmentent pas la taille des parcelles mais leur nombre. La petite taille des parcelles permet aussi de mieux gérer les risques de sécheresse et de dépressions cycloniques.

Morelli a fait son étude à Malo et a observé des durées de jachères moyennes de 28,2 ans. Les durées de jachères observées à Avounaleleo en 2011 sont en moyenne de 19,6 ans, et donc bien inférieures à celles observées en 2003. Actuellement chaque foyer de Malo bénéficie de 27,6 ha de bonnes terres. On peut penser que cette superficie était supérieure il y a quelques années, car la population du Vanouatou ne cesse de croître, en fait elle double tous les 20 ans. Et si le temps de jachère est plus court dans les zones à forte pression anthropique, le temps de culture également.

4.2. Caractérisation chimique des terres analysées (0-20 cm)

Le regroupement des parcelles par village dans l'analyse des composantes principales montre que les résultats sont cohérents, bien que souvent surprenants. La composition chimique des sols est différente selon les villages.

Il n'y a que les sols de Lamlou qui aient une composition très différente de celle des autres villages. Les taux de matière organique augmentent des régions les plus sèches aux régions les plus humides (Quantin, 1980). Dans l'échantillonnage, Lamlou est le seul village situé dans le sud de l'archipel Vanouatou. Les pluies y sont plus saisonnières et la température est inférieure aux autres villages. Cela pourrait expliquer qu'à Lamlou la teneur en matière organique des sols soit significativement inférieure aux autres villages.

Mis à part à Lamlou, les sols du Vanouatou sont riches en matière organique dans les 20 premiers centimètres du sol. La matière organique intervient sur de nombreuses propriétés du sol. C'est un réservoir d'éléments nutritifs. Dans un contexte sans intrant chimique, son rôle est donc très important. Ces sols ont un taux de cations élevés. En effet, sous forêt les feuilles qui retombent contribuent à recycler les cations dans la partie supérieure du sol (Tavares-Filho, Tessier, 1998).

Il est apparu dans les travaux de Quantin (1980) que les sols du Vanouatou sont relativement pauvres en phosphore. Ce travail, effectué sur les sols sous cultures du Vanouatou, montre que les quantités de phosphore sont faibles par rapport aux autres minéraux (inférieur à 50 mg/100g. Le phosphore pourrait donc être un élément limitant, compromettant ainsi la fertilité des sols.

La notion de « fertilité » d'un sol est floue. Les termes utilisés par les agriculteurs du Vanouatou pour décrire la qualité d'un sol se limitent à « bonne » ou « mauvaise » terre. Ainsi, dans le but de trouver un terme synthétique d'appréciation de la fertilité du sol, l'expression « fertilité agronomique » correspond à l'ensemble des fonctions de productions de production relatif à un sol dans un milieu agronomique donné (Reboul, 1989). Par exemple, on ne peut pas parler de fertilité sans connaître au préalable les besoins en nutriments des racines et tubercules. Or, il se trouve que les besoins des racines et tubercules en phosphore sont faibles, nous laissant supposer que cet élément n'est pas ici limitant.

Une quantité plus élevée de potassium est disponible dans le sol lorsque les sols sont occupés par de l'igname plutôt que par des patates douces (Mertz, 2012). Ceci peut s'expliquer par le fait que la jachère qui précède la mise en culture est plus longue dans le cas de l'igname. Les résultats de cette étude montrent qu'au Vanouatou, en effet les parcelles destinées dans un premier temps aux ignames sont plus riches en potassium, magnésium, et en calcium. L'agriculteur semble choisir les sols les plus riches pour cette culture, réputées exigeante et toujours de tête d'assolement.

4.3. *Historique des parcelles et évolution des sols*

Aux îles Salomon les temps de jachères avant ou après le manioc et de la patate douce sont plus courts que ceux de l'igname (Mertz, 2012). Ce qui d'ailleurs a contribué à faire diminuer les teneurs en carbone et en azote du sol. Au Vanouatou, les temps de jachères ne dépendent pas du type de culture, car le manioc suit bien souvent l'igname sur la même parcelle.

Szott et Palm (1996) ont montré que la quantité de nutriments diminue pendant les premières années de jachère, car ils sont transférés à la biomasse. Au contraire, notre travail montre que les parcelles étudiées s'enrichissent en matière organique et en éléments minéraux, et ce dès les premières années de jachère. La matière organique ayant une bonne capacité d'échange cationique, cette dernière s'améliore durant la jachère. De même, nos résultats montrent que les sols s'acidifient durant la période de culture, et à l'inverse le pH augmente durant la période de jachère.

Ce travail montre aussi qu'une grande surface de terres disponible permet aux agriculteurs de mettre en œuvre de longues jachères. Cela expliquerait en partie pourquoi dans les îles à faible pression anthropique, où la quantité de bonnes terres est importante, une grande quantité de matière organique, de potassium, de magnésium, de calcium se retrouve dans le sol, ainsi qu'une capacité d'échange cationique plus élevée.

4.4. Une relative stabilité chimique des sols

Aucune teneur en minéraux ne diminue significativement sur les cinq premières années du cycle de culture. Ce phénomène peut avoir plusieurs explications.

Tout d'abord les racines et tubercules, principales plantes de ces systèmes, ne prélèvent pas des quantités importantes de minéraux (Blamey, 1996 ; Bradbury and Holloway, 1998 ; Soro *et al.*, 2000 ; Memento, 2002 ; Howeler, 2002 ; Lebot, 2009 ; O'Sullivan, 1997). Et leurs besoins sont minimes par rapport aux quantités présentes dans le sol.

Sur des sols brésiliens, Tavares-Filho et Tessier (1998) ont montré que lorsque le sol contient de nombreux cations, les exportations dues aux récoltes n'entraînent pas de changement significatif du complexe d'échange, quel que soit le mode de gestion du sol. Cela pourrait en partie expliquer que les sols du Vanouatou, riches en cations, répondent par une certaine stabilité à la mise en culture.

Les rotations mises en place au Vanouatou permettent des cycles de cultures qui se chevauchent tout au long de l'année. Les nombreuses associations de plantes développent également différentes structures de la végétation cultivée ainsi que différents systèmes racinaires. De plus, chaque plante a des besoins différents en minéraux. Toutes ces caractéristiques, propres aux systèmes de cultures vivriers tropicaux et notamment mis en place au Vanouatou, permettent d'optimiser les ressources du milieu (Domas, 2003), comme cela a également pu être observé au Cameroun (Carrière, 2003). Ce qui est particulièrement important dans un système de culture sans intrant. Par ailleurs la plupart des agriculteurs, après avoir défriché la parcelle, laissent la biomasse, soit dans, soit aux abords de la parcelle. Ce qui constitue un paillage qui, après dégradation, augmente le taux de matière organique du sol. Ce paillage stimule également l'activité biologique de la faune du sol, apporte des nutriments et en améliore les propriétés du sol (Domas, 2003). En outre lorsque la parcelle est cultivée, la chute des feuilles, des fleurs et des fruits des espèces du recru constitue un paillage régulier et naturel, protège ainsi le sol de l'érosion éolienne, de la lixiviation et stimule également l'activité biologique.

Mertz (2012) a montré qu'aux îles Salomon, il n'y a pas de changement notable de composition du sol lorsque les pratiques changent à court terme. Au Cameroun, Fotsing (1993) a étudié des sols riches et bien structurés, qui présentent peu de signes d'érosion malgré la forte densité humaine qu'ils supportent. Au Vanouatou aussi, les sols sont riches et bien structurés (Quantin, 1980). Cette richesse pourrait expliquer en partie la stabilité de la composition chimique des sols sous cultures. A Madagascar, Andriamaniraka et ses collaborateurs (2010) ont montré que les quantités de phosphore dans le sol ont suivi les rendements annuels des cultures. De la même manière au Vanouatou les flux entrants ne changent pas. Comme les rendements chutent au cours du temps, les exportations en minéraux par les espèces cultivées diminuent et donc les teneurs en cations augmentent.

Par ailleurs il y a peu de travail du sol par l'agriculteur. Le recru est éliminé par sarclage manuel autour des racines et tubercules. Cela maintient un taux de matières organiques plus élevé que le labour classique, et donc améliore la gestion des stocks organiques (Tavares-Filho, Tessier, 1998).

Enfin ces parcelles se trouvent immergées au sein d'une matrice de forêt secondaire, et la litière libérée par celle-ci apporte des minéraux dans la parcelle, notamment par effet de bordure mais aussi de part la petite taille des parcelles.

Normalement le chaulage¹ rend le sol plus basique et augmente ainsi le taux de cations contenus dans le sol. De manière générale, il est reconnu qu'un sol avec un pH et une capacité d'échange cationique élevés a plus de cations (Palmans, Van Houdt, 1998). Cependant, malgré une diminution du pH au cours du cycle de culture dans les systèmes végétaux du Vanoutaou, la quantité de cations présents dans le sol, elle, augmente.

4.5. Les rendements

Les rendements des racines et tubercules en cultures associées sont très variables d'une culture à l'autre (Akoroda, 1995).

Néanmoins les rendements obtenus par notre méthode sont du même ordre de grandeur que ceux qu'avait obtenus Morelli, entre 20 et 30 tonnes par hectare et par an. Des rendements de 17,5 tonnes par hectare et par an ont été obtenus pour le manioc (Amnay, 2002 cité par Morelli, 2003), l'igname donne 4 à 8 tonnes par hectare et par an en Côte d'Ivoire (Dumbia, 2002). Aux îles Salomon, les patates douces sont souvent cultivées en monoculture, avec un rendement de 20 tonnes par hectare et par an (Mertz, 2012). Vernier (2011), quant à lui, trouve des rendements de l'ordre de 9,8 tonnes par hectare et par an pour des parcelles d'ignames, et 10,1 tonnes par hectare et par an pour des parcelles de manioc. Ces données confortent la fiabilité des estimations obtenues par la méthode développée dans notre étude.

Les rendements des systèmes de cultures traditionnels du Vanouatou sont élevés. Des résultats obtenus en Côte d'Ivoire, qui même avec un apport de 580 kg/ha d'intrants, ne dépassent pas 15t/ha (Soro *et al.*, 2000).

Dans notre étude, les rendements diminuent significativement au cours du cycle de culture, dans la plupart des îles étudiées. Ces baisses de rendements après deux ou trois années de cultures successives sont corroborées par de nombreuses études (Jordan, 1989 ; Kleinman *et al.*, 1995 ; Nye and Greenland, 1960).

Cette diminution est souvent attribuée à la baisse de fertilité agronomique du sol ou à l'invasion par les adventices. Le rendement ne peut pas être limité au climat, au sol et aux pratiques agricoles mais résultent également d'aspects écologiques, socio-économiques et du contexte culturel.

4.6. Ce qui influence les rendements

Il est difficile de comprendre les liens directs entre les rendements et tous les paramètres du milieu, notamment les durées de jachères. On pouvait s'attendre à ce que les rendements dépendent de la teneur en matière organique et en minéraux.

Or, ici les rendements semblent influencer la composition des sols. En effet, les plantes semblent absorber les minéraux du sol de manière très modérée. Et on peut penser que si ces minéraux n'influencent pas les rendements, c'est probablement parce qu'ils ne constituent pas un élément limitant. Par exemple, Tansip est le village où les sols sont les plus riches en azote, tandis que Lamlou a les sols les plus pauvres des six villages. Le climat est très différent, plus sec et froid à Lamlou où la matière organique se décompose plus lentement qu'à Tansip. Cela n'empêche pas ces deux villages d'avoir les meilleurs rendements malgré des sols différents. Il est admis que les systèmes de culture ont un rapport durée de jachère-durée de culture optimum, au-delà duquel la jachère est contre productive car la forêt devient difficile

¹ Technique agricole reposant sur l'apport d'un amendement calcaire ou calco-magnésien à un sol pour en corriger l'acidité. Le terme de chaulage désigne aussi tout apport de calcaire autre que la chaux.

à éclaircir et en-dessous de laquelle les sols s'épuisent. Ainsi avec des cultures telles que le maïs ou le riz les conséquences de la diminution du temps de jachère sont plus évidentes qu'avec les cultures de manioc (Kato *et al.*, 1999, cité par Mertz, 2002). Or au Vanouatou, même avec des durées de jachères inférieures à deux ans, les rendements ne semblent pas affectés. D'ailleurs les résultats de ce travail montrent que la durée de jachère est corrélée négativement avec les rendements. Il apparaît que s'il y a beaucoup de personnes à nourrir et peu de place disponible, les agriculteurs vont produire en conséquence, indépendamment des durées de jachères et de la composition chimique des sols. Ceci montre bien que la composition chimique du sol n'est pas un facteur limitant. En outre les rendements ne sont que faiblement corrélés aux teneurs en minéraux. Mishra et Ramakrishnan (1981) ont mené des travaux qui ont également aboutis à une absence de corrélation entre la composition des sols et les rendements. Il est possible, lorsque le sol est fertile, que les rendements augmentent au cours des années sans fertilisation, comme cela a été remarqué pour la patate douce en Papouasie-Nouvelle-Guinée (Sillitoe, 1995).

L'évolution des rendements au cours du temps n'est pas la même dans chaque village. Dans les villages à forte pression anthropique les rendements diminuent de manière drastique dès les premières années de culture, tandis qu'à Avounaleleo et Brenwé, on observe une certaine stabilité des rendements. Les pratiques culturelles ne sont donc pas les mêmes. Un agriculteur de Tansip s'investit davantage sur ses parcelles de première année, et il les met en jachère deux à trois ans après l'ouverture. La superficie de bonnes terres disponibles pourrait expliquer en partie ce comportement. En effet, ayant seulement 0,3 ha en moyenne pour nourrir sa famille, l'agriculteur de Tansip ne peut pas faire de longues jachères, et donc met en place des cycles de culture plus courts qu'à Avounaleleo.

Une augmentation de la quantité de travail fournie compense la diminution du temps de jachère (Boserup's, 1965 cité par Mertz, 2002). On ne peut que déplorer ici, l'absence de données qui nous permettrait de vérifier ce lien. Dans tous les cas, la diminution des temps de jachères est une évolution récente au Vanouatou et cela mériterait de poursuivre des analyses de sols ultérieurement pour observer les conséquences à long terme de ces raccourcissements du temps de jachère.

Les rendements des parcelles dépendent beaucoup de l'âge de la parcelle. On voit que les agriculteurs cultivent de moins en moins de plantes en deuxième année qu'en première année, jusqu'à l'abandonner complètement quelques années après l'ouverture. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, cet abandon n'est pas le résultat de l'appauvrissement des sols. La chute des rendements au cours du temps témoigne plus d'un abandon progressif de la parcelle que d'un appauvrissement des sols. La diminution de la densité de pieds plantés au mètre carré en est la cause principale. Il est reconnu qu'une des causes d'abandon de la parcelle peut être l'enherbement ou le recru, de plus en plus important au cours des années de culture (Montillet, 1988 ; Somé, Alexandre, Hien, 1999 ; Carrière, 2003 ; Ducourtieux, 2004). En zone tropicale humide le recru est important et se développe très rapidement, et c'est généralement ce qui pousse l'agriculteur à pratiquer une agriculture itinérante (Guyot et Duee, 2003). Un envahissement des adventices au jeune âge de la parcelle a un effet négatif considérable sur le rendement (Lebot, 2009). L'installation du recru est dictée par des facteurs naturels d'ordre agro-écologique, et également à des éléments du système de culture que sont l'âge de la parcelle, la rotation et les différentes étapes des itinéraires techniques employés (Le Bourgeois, 1993). Les espèces, essentiellement herbacées, sont parfois utilisées par les agriculteurs pour

définir un itinéraire technique à appliquer aux parcelles en culture (Somé, Alexandre, Hien, 1999). Cela pourrait être le cas au Vanouatou, où le recru y est omniprésent. Des enquêtes et des observations permettraient d'étudier cette hypothèse.

Le principal intrant de ces systèmes est le travail fourni par les agriculteurs. Ainsi tout ce qui rajoute du travail, comme les cultures de rente qui induisent un désintéressement de l'agriculteur pour ses parcelles vivrières, ou au contraire ce qui facilite le travail, comme la proximité de la parcelle, va impacter directement le rendement. Claus (1998) a montré que les baisses de rendement des tarodières irriguées de Futuna étaient dues à une baisse de la disponibilité de la main d'œuvre. Pour résumer, si le facteur déterminant principal du rendement est la propreté de la parcelle en début de culture, pendant que la plante développe son système racinaire traçant, alors toute négligence de la parcelle durant les trois premiers mois après la plantation, aura un effet négatif sur le rendement final. Si les producteurs sont occupés à d'autres tâches, leurs parcelles vivrières sont négligées et les rendements chutent, indépendamment à la composition du sol.

En Thaïlande, Domas (2003) constate que la diminution du temps de jachère entraîne un phénomène de savanisation, dû à la colonisation par les adventices. En effet la jachère nettoie la parcelle des principaux germes, et l'abattis-brûlis achève ce nettoyage (Guyot et Duee, 2003). Ainsi l'entretien de la parcelle en première année est moins intense qu'en deuxième année. Une étude en Côte d'Ivoire montre que les rendements augmentent avec un second nettoyage si la jachère a duré deux ans, tandis qu'avec une durée de jachère de 4 ans, le second nettoyage n'a aucun effet (Slaats *et al.*, 1998 cité par Mertz, 2002).

Dans le Pacifique, les rendements des parcelles pourraient chuter également pour une raison purement sociale : les jeunes sont moins intéressés par l'agriculture en général (Birch-thomsen *et al.*, 2012 ; Reenberg *et al.*, 2008), ce qui contribue à faire diminuer la main d'œuvre disponible pour les cultures.

Lorsque l'écartement entre les plants est grand, le rendement par pied est plus important, à condition de bien entretenir la parcelle car la présence d'adventices fait chuter les rendements. Et lorsque les pieds sont trop nombreux, les rendements peuvent chuter parce que la production d'un pied devient trop faible. Or, les rendements augmentent systématiquement lorsque le nombre de pieds augmentent. Les densités n'ont pas encore atteints leur optimum.

Lorsque que les agriculteurs engendrent des revenus, issus de l'agriculture ou de travaux salariés, leur calendrier de travail s'en trouve bouleversé. Le temps dédié à gagner de l'argent empiète sur celui destiné aux parcelles vivrières.

4.7. Cultures de rentes et cultures de subsistance

Les revenus issus de l'agriculture sont plus importants dans les zones de basse pression anthropique (Haudebourg, 2012). En effet, il semblerait y avoir plus de place pour y planter des cultures de rente, comme du cacao à Brenwé, des plantations de cocotiers à Avounaleleo ou bien du kava à Pésséna. A Lamlou il y a des plantations de café mais elles sont surtout le résultat de projets de développement qui incitent les agriculteurs.

En effet, à Lamlou, il est aisé de constater qu'il n'y a pas beaucoup d'espaces exploitables pour cultiver, que ce soit des cultures de rentes ou des cultures vivrières. En effet, le nombre de pieds plantés au sein des parcelles témoigne qu'il faut optimiser la production sur une parcelle donnée.

D'une manière générale quand les agriculteurs s'investissent dans des cultures de

rente, il y a une répercussion directe sur les rendements des parcelles vivrières. Mertz (2002) affirme que les sols les plus riches sont réservés aux cultures de rentes, tandis que les cultures vivrières sont reléguées sur les sols les moins aptes à la culture. C'est le cas à Pésséna par exemple où les plantations de cocotiers sont sur des terrains plats et accessibles alors que les parcelles vivrières sont à plus d'une heure de marche sur des terrains pentus. Quand les cultures de rentes deviennent importantes, les agriculteurs maintiennent tout de même leurs parcelles vivrières, mais à une plus petite échelle et avec des rendements moindres, ce qui est corroboré par les résultats obtenus par Mertz (2002). Les agriculteurs ont moins de temps à consacrer à leurs parcelles, et en plus les revenus agricoles leur offrent la possibilité d'acheter de la nourriture. Ils ne sont donc plus complètement dépendants de l'agriculture.

4.8. Aspects nutritionnels

On considère que le terme valeur nutritionnelle englobe l'ensemble des caractéristiques déterminant l'aptitude d'un aliment à couvrir les besoins nutritionnels de l'organisme auquel il est destiné (Treche, 1998). Dans notre étude, nous estimons la valeur nutritionnelle des produits frais. Les traitements appliqués aux racines et tubercules frais, comme la cuisson, modifient leur valeur nutritionnelle, ne sont pas considérés. On parle donc de valeur nutritionnelle potentielle.

Les céréales contiennent plus de matière sèche (références en annexe 3) et cette matière sèche est plus riche en minéraux et protéines que celles des racines et tubercules. Néanmoins, la moyenne des rendements des systèmes dans les six villages est égale à $4,1 \cdot 10^6$ Kj. On peut donc dire que les rendements moyens d'une parcelle de racines et tubercules au Vanouatou suffisent à couvrir les besoins énergétiques d'une personne, et ce seulement avec les cinq espèces prises en compte. Sachant que les agriculteurs ouvrent en moyenne trois parcelles chaque année (Siméoni, 2009), le système de production mis en place par l'agriculteur peut répondre aux besoins d'une famille. A Pésséna, Brenwé et Avounaleleo, les faibles rendements de racines et tubercules frais ne permettent pas de couvrir les besoins énergétiques standards de 2 200 kJ par jour (Anses, 2012). Pésséna et Brenwé sont deux villages tournés vers des cultures de rentes, respectivement le kava et le cacao, qui permettent aux ménages de ces villages d'engendrer des revenus. Les habitants de ces villages peuvent donc compléter leurs apports caloriques par des denrées alimentaires achetées. Le cas d'Avounaleleo est différent. Les cultures de rente mises en place, majoritairement des cocotiers, sont moins lucratives que celle des autres villages. Ce qui pourrait expliquer que les revenus soient modestes. Nous ne disposons pas de toute l'information qui nous permettrait de comprendre pourquoi il y a moins de revenus engendrés par les cultures de rentes à Avounaleleo. Par exemple, il pourrait s'agir de conflit foncier.

Les racines et tubercules sont principalement constitués d'amidon. Quantitativement les apports sont suffisants, mais qualitativement les céréales sont plus intéressantes que les racines et tubercules car elles contiennent plus de protéines et de minéraux. On pourrait penser que les rendements en matière sèche des céréales sont plus importants. En comparant les céréales et les racines et tubercules, sur la base de rendements moyens de matière fraîche (FAOSTATS, 2012), il semble que les racines et tubercules ont des rendements plus élevés en matière sèche, amidon et en protéines. En revanche les céréales restent plus intéressantes en termes d'apport en minéraux. C'est sans compter les apports variés de fruits et de légumes-feuilles. Par exemple au Vanouatou les besoins en protéines sont couverts par le

chou des îles (*Abelmoschus manihot*), cultivé en association avec les racines et tubercules et toujours consommé avec.

Notre méthodologie montre qu'une parcelle du système végécole au Vanouatou peut produire assez au cours du cycle de culture pour couvrir les besoins standards d'un être humain. Le village de Tansip est la preuve que quand il y a peu de terres disponibles, que ce soit pour établir des cultures de rente, soit pour se nourrir, le peu de parcelles vivrières que l'on peut mettre en place ont des rendements qui pourraient permettre de nourrir une personne. Mais y a-t-il assez de parcelles pour nourrir toute la population ?

En 2007, 64% des besoins alimentaires du Vanouatou sont couverts par des denrées importées sous forme de riz (10 951 tonnes), et de farines de blé (4 798 tonnes) (Siméoni, 2009). Aux îles Salomon comme au Vanouatou, il apparaît que les gens aiment varier leur bol alimentaire, et achètent du riz alors que ce n'est pas une nécessité (Mertz, 2012). Connaître les rendements moyens des parcelles et des systèmes est une première étape dans l'étude des potentialités des systèmes végécoles.

4.9. Limites de la méthode

La méthode comporte certaines limites dont il faut avoir conscience lorsque l'on manipule les résultats.

Tout d'abord le GPS représente une limite technique. Les surfaces calculées ne sont pas exactes. Cependant la précision de ce type de GPS a ses limites, et il est préférable de répéter plusieurs fois les mesures, notamment lorsque la forêt est dense et/ou la couverture nuageuse importante.

Le fait de prendre un poids standard pour chaque espèce peut paraître une limite à l'exactitude de la méthode compte tenu de la grande variabilité morphologique des racines et tubercules. De plus le choix d'un poids standard cache le lien véritable entre la composition des sols et les rendements. Par exemple, les ignames d'un sol carencé seront moins grosses que ceux d'une parcelle riche en minéraux. Ou encore les ignames plantées en faible densité devraient être plus grosses que les ignames plantées en plus grande densité. En outre, le recru est un facteur de diminution des rendements. La méthode mise au point ne permet pas de rendre compte de la diminution de productivité des cultures dues au recru. Il est possible de peser chaque racine et tubercule, mais ce dispositif est long à mettre en place. Choisir un poids standard reste le seul moyen rapide, peu onéreux et simple d'obtenir des estimations de rendements.

Cette méthode utilise de nombreuses moyennes : le poids moyen de chaque espèce, puis la production moyenne par village, ou encore la production moyenne de la première année. Cela lisse l'information et il faut être prudent dans l'interprétation des résultats.

De plus, les cycles de cultures étudiés sont reconstitués à partir de cinq parcelles différentes. La construction de la chronoséquence tient sur l'hypothèse que les parcelles sont similaires. Or il y a des différences, qui introduisent de la variabilité dans les résultats.

Nous avons attribué les flux de minéraux aux seules exportations de racines et tubercules. Des mesures d'érosions, de ruissellement et d'autres caractéristiques du milieu aboutiraient à une modélisation moins sommaire du milieu.

Les rendements sont théoriques, et on ne prend en compte ni les pertes aux champs

causées par les ravageurs et les maladies, ni les pertes, qui suivent les récoltes. De plus cette méthode serait beaucoup plus pertinente si l'on connaissait le temps de travail de l'agriculteur, la structure et la composition du recru, pour justement les mettre en relation avec ces rendements.

Enfin cette méthodologie constitue une première approche sur la durabilité des systèmes en termes de valeur nutritionnelle. Sachant qu'il y a de nombreuses ressources alimentaires en dehors des parcelles, sur les bords des routes, dans la forêt, dans les plantations et également dans les épiceries, on se rend compte des limites que représente le cadre fixé.

4.10. Possibilités d'amélioration

Ces plantes ont un rendement très variable. Certaines techniques d'enquête, issues de l'anthropologie, permettent d'obtenir l'estimation fiable du rendement grâce aux dires d'acteurs. Cette méthode consiste à choisir un objet dont l'agriculteur se sert pour récolter ou stocker ces produits, ou les transporter. Il lui est plus facile de visualiser combien de paniers, sacs ou brouettes il a récolté, vendu ou transporté. Ces chiffres sont également approximatifs.

Une autre technique consiste à mesurer, et non plus estimer, le rendement exact d'une ou plusieurs parcelles, comme l'a fait Mertz en 2012. Ces mesures sont comparées aux estimations obtenues par notre méthode. Le but est de comparer les deux rendements pour voir si l'on obtient le même ordre de grandeur.

Si l'on dispose de plusieurs années pour connaître les rendements des systèmes végétaux, le mieux est de former les agriculteurs à peser leurs prélèvements dans leur parcelle. Ce dispositif demanderait plus d'une année avant d'obtenir des résultats.

Notre méthode produit un résultat au bout de quelques mois d'investigation. Une mesure précise du recouvrement et de la composition du recru, et un entretien avec l'agriculteur pour estimer le nombre d'heures passées sur la parcelle sont des clés de compréhension, et donc utiles à la méthode. Dans cette étude nous ne nous sommes pas focalisés sur l'ensemble des parcelles vivrières d'un même ménage. Il aurait pourtant été possible de connaître combien un ménage produisait en un an avec ses parcelles vivrières, et faire ainsi le rapprochement avec ses besoins et sa consommation.

Notre méthode préconise le prélèvement des sols lors des cinq premières années de cultures. Or il aurait été intéressant de connaître la composition du sol avant éclaircie par exemple, ou après plusieurs années de jachères.

Conclusion

D'après les rendements moyens obtenus par notre méthodologie, il apparaît que l'agriculture itinérante sur brûlis peut garantir la subsistance vivrière de la population du Vanouatou. Les sols des parcelles sont stables tout au long du cycle de culture. La résilience des sols est due à leur richesse chimique et au système de culture mis en place. En particulier, les racines et tubercules ont de faibles besoins en minéraux, et ne nécessitent pas d'intrants. Ce qui ressort de cette étude est que les rendements des parcelles ne se résument pas à une problématique agronomique. En effet, la composition chimique des sols et les durées de jachère n'expliquent pas la variabilité des rendements. Nos résultats suggèrent que d'autres facteurs, d'ordre socio-économique, jouent un rôle prépondérant dans les systèmes de cultures végétales du Vanouatou. Par exemple, il s'avère que les agriculteurs ayant des cultures de rentes (et donc des revenus), s'investissent moins dans leurs parcelles vivrières. Ou encore, lorsque la pression sur les terres est forte et qu'il y a beaucoup de personnes à nourrir, les rendements des cultures vivrières augmentent.

La méthodologie mise au point ici peut constituer un outil dans le suivi de ces dynamiques. Elle permet d'estimer les rendements à l'échelle de la parcelle, et peut par conséquent être utilisée à l'échelle du système de culture. Il serait judicieux de valider cette méthodologie, par exemple en comparant l'estimation à la mesure des rendements réels.

Une démarche pluridisciplinaire semble pertinente dans l'étude de l'agriculture itinérante sur brûlis. Ainsi nos résultats seront mis en relation avec les différentes représentations spatiales, les stratégies paysannes par exemple, ou encore avec les analyses chimiques des racines et tubercules. En effet, l'utilisation de la spectrométrie proche infrarouge devrait permettre de prédire la composition chimique des sols et des racines et tubercules de manière plus rapide et moins onéreuse.

Bibliographie

- Andriamaniraka et al.** 2010. Influence de différents systèmes de culture sur la productivité de sols cultivés des Hautes Terres de Madagascar et conséquences pour le bilan de phosphore. *Etudes et gestion des sols*, 17, 2, 119-130p.
- Afssa.** 2012. Table Ciqua 2012. Composition nutritionnelle des aliments. French food composition table. [On- line] [10/08/2012] <URL: <http://www.afssa.fr/TableCIQUAL/index.htm>>
- Allen M.G.** 2001. Change and continuity: land use and agriculture on Malo island, Vanuatu. Canberra : Australian National University 201p.
- Akoroda M.** Agronomic aspects of root and tuber crops important for estimating production: cassava and sweet potato in relation to time and input variables. In FAO statistics division and regional office for Africa. Proceedings of the expert consultation on root crop statistics Rome : FAO, 35p. (Vol. 1). Proceedings of the expert consultation on root crop statistics, Harare, Zimbabwe, 3-6 December 2002.
- Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses).** 2012. On- line] [14/09/2012] <URL: <http://www.anses.fr/Documents/ANC-Ft-TableauxApportsE.pdf>>
- Aprifel.** 2012. Les fiches nutritionnelles par produits. Bananes. Tableau des compositions moyennes. [On- line] [12/08/2012] <URL: <http://www.aprifel.com/fiches produits.php?p=9&c=3>>
- Banque mondiale.** 2012. Données. Vanuatu. [On- line] [10/09/2012] <URL : <http://donnees.banquemondiale.org/pays/vanuatu>>
- Birch-Thomsen T. et al.** 2010 Continuity and change: spatio-temporal land use dynamics on Bellona Island, Solomon Islands Singapore. *Journal of Tropical Geography*, 31 27-40p.
- Blamey F.P.C.** 1996. Correction of nutrition disorders of sweet potato and taro :fertilizers and soil amendments. In Craswell E.T. et al. Mineral Nutrient Disorders of Root Crops in the Pacific. Canberra : ACIAR Proceedings No. 65, 91-95p.
- Blanco J.** 2011. Mise au point d'un indice pour l'analyse spatio-temporelle de l'agrobiodiversité. Montpellier : ENGREF, 78 p. Mémoire.
- BMCE.** 2012. Vanuatu : le contexte économique. [On-line][16/09/2012]<URL: <http://www.bmcetrade.com/fr/observer-les-pays/vanuatu/economie-3>>
- Bonnemaïson J.** 1996. Les fondements géographiques d'une identité : l'archipel du Vanuatu. Essai de géographie culturelle, livre 1 : Gens de pirogue et gens de la terre. Paris : ORSTOM, 460 p
- Bourrieau M.** 2000. Valorisation des racines et tubercules tropicaux pour l'alimentation humaine en Océanie : le cas du laplap au Vanuatu. Montpellier: ENSIA-SIARC, 100 p.
- Bradbury, J.H. and Holloway, W.D.** 1988. Chemistry of tropical root crops : significance for nutrition and agriculture in the Pacific. Canberra : ACIAR Monograph No. 6. 201p.
- Bruun T. B. et al.** 2009. Environmental Consequences of the Demise in Swidden Cultivation in Southeast Asia: Carbon Storage and Soil Quality. *Human Ecology*, 37(3), 375-388. doi:10.1007/s10745-009-9257-y

Caillon S. 2005. Pour une conservation dynamique de l'agrobiodiversité. Gestion locale de la diversité variétale d'un arbre « des blancs » (cocotier, *Cocos nucifera* L.) et d'une plante « des ancêtres » (taro, *Colocasia esculenta* (L.)Schott) au Vanuatu. Orléans : Université d'Orléans, 263p.

Carrière S. 2003. Les orphelins de la forêt : Pratiques paysannes et écologie forestière (Ntumu, Sud-Cameroun). Montpellier : Éditions IRD, Collection A Travers Champs, Paris, 374p

Chalit A. Estimation of area, yield and production of root and tuber in Thailand. In FAO statistics division and regional office for Africa. Proceedings of the expert consultation on root crop statistics Rome : FAO, 35p. (Vol. 1). Proceedings of the expert consultation on root crop statistics, Harare, Zimbabwe, 3-6 December 2002.

Chambre d'agriculture du Tarn, Ministère de l'agriculture et de la pêche, Agence de l'eau Adour-Garonne. 2010. Bilan global de fertilisation azotée. [On-line][22/08/2012]<URL: http://www.tarn.chambagri.fr/fileadmin/DocInternet/filieres/agronomie_environnement/bilan_global_azote.pdf>

Champagne A., Legendre L., et Lebot V. 2009. Chemotype Profiling To Guide Breeders and Explore Traditional Selection of Tropical Root Crops in Vanuatu, South Pacific. *Journal of agriculture and food chemistry*. 57, 10363-10370p. DOI:10.1021/jf903321e

Cirad, Gret, France-MAE. 2002. Mémento de l'agronome. Montpellier, France : Cirad, 1691 p.

Claus J. C. 1998. Les tarrodières irriguées de Futuna. Mémoire. Montpellier : Centre national d'études agronomiques des régions chaudes et Ecole supérieure d'Agronomie tropicale (C.N.E.A.R.C./E.S.A.T.), 169p.

Cnuced. 2012. INFOCOMM FICHE PRODUITS MANIOC. [On-line][24/07.2012] <URL : <http://www.unctad.info/fr/Infocomm/Produits-AAACP/FICHE-PRODUIT---Manioc/>>

Domas, R. 2003. Les systèmes de culture à base de couverture végétale comme alternatives à la défriche-brûlis dans le nord de la Thaïlande. Exemple du district de Bo Kluea, Province de Nan. Montpellier: CNEARC, 179p.

Ducourtieux O. 2004. Agriculture d'abattis-brûlis et élimination de la pauvreté : un problème complexe. Paris : Comité de Coopération avec le Laos (CCL), 28p.

Dumbia S. Agronomic aspects of root and tuber crops important for estimating production. In FAO statistics division and regional office for Africa. Proceedings of the expert consultation on root crop statistics Rome : FAO, 35p. (Vol. 1). Proceedings of the expert consultation on root crop statistics, Harare, Zimbabwe, 3-6 December 2002.

FAO. 2010. Nutrition and consumer protection. Vanuatu. Summary. [On-line][16/09/2012] <URL : http://www.fao.org/ag/agn/nutrition/vut_en.stm>

FAOSTATS. 2012. Vanuatu overview. [On-line][16/09/2012] <URL: http://faostat3.fao.org/home/index.html#VISUALIZE_BY_AREA>

FAOSTATS. 2012. Production. Crops. [On-line][18/09/2012] <URL: <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>>

Fotsing J.M. 1993. Erosion des terres cultivées et propositions de gestion conservatoire des sols en pays bamiléké (Ouest-Cameroun). Cahiers de l'ORSTOM. Montpellier : Maison de la télédétection. Vol XXVIII, n°2 : 351-366p.

Guyot A., Duee A.S. 2003. La gestion de l'enherbement dans les cultures de raciness et tubercules en zone intertropicale. Synthèse bibliographique. Montpellier : CNEARC, 29p.

Haudebourg C. 2012. Rapport de la tâche 5-compréhension des stratégies paysannes. Aix en provence : Universite de Provence et CREDO. 26 p.

Howeler R.H. 2002. Cassava mineral nutrition and fertilization. In Hillocks R.J. Thresh J.M. et Bellotti A.C. Cassava, Biology, Production and Utilization. Wallingford :CAB international, 115-147p.

Huxley P.A. 1999. Tropical agroforestry. Oxford: Blackwell Science, 371p.

Itharattana K. Forecast of area, yield and production of Thai cassava roots. In FAO statistics division and regional office for Africa. Proceedings of the expert consultation on root crop statistics Rome : FAO, 35p. (Vol. 1). Proceedings of the expert consultation on root crop statistics, Harare, Zimbabwe, 3-6 December 2002.

Johnson D.E. et al. 1991. Experiments with upland rice in southern Belize: Fertilizer application, weed control, plant spacing, sowing rate and variety. *Journal of Agricultural Science*. 116: 201-215p.

Jordan C.F. 1989. An Amazonian Rain Forest. The Structure and Function of a Nutrient Stressed Ecosystem and the Impact of Slash-and-Burn Agriculture. Man and Biosphere Series. Lancs : The Parthenon Publishing Group.

Kleinman P.J.A. et al. 1995. The ecological sustainability of slash-and-burn agriculture. *Agriculture. Ecosystems and Environment*, 52: 235-249p.

Lamanda N. 2005. Caractérisation et evaluation agroécologique de systems de culture agroforestiers : une démarche appliquée aux systèmes de cultures à base de cocotiers (*Cocos nucifera* L.) sur l'île de Malo, Vanuatu. Thèse de doctorat. Paris : INAPG, 273p.

Le Bourgeois T. 1993. Les mauvaises herbes dans la rotation cotonnière au Nord-Cameroun (Afrique). Thèse de doctorat. Montpellier : USTL, 204p.

Lebot V. 2009. Tropical root and tuber crops, cassava, sweet potato, yams and aroids. Oxfordshire : CABl, 440p.

Lutaladio N. Agronomic aspects of root and tuber crops and their importance in estimating production. In FAO statistics division and regional office for Africa. Proceedings of the expert consultation on root crop statistics Rome : FAO, 35p. (Vol. 1). Proceedings of the expert consultation on root crop statistics, Harare, Zimbabwe, 3-6 December 2002.

Mani A. 2012. Yale. Tropical Resources Intitute. Fellows. Cultivating Food Security: Ni-Vanuatu Women's Relationship with Food, Bio-diversity, Natural Resources and Food Policy. [On- line] [22/09/2012] <URL: <http://environment.yale.edu/tri/fellow/1628/>>

Manrique K., Hermann M. 2002. Comparative study to determinate stable performance in sweet potato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam.) Regional trials. In Ames T. *Proceedings of the first*

international conference on Sweet potato. Food and health for the Future. Leuven, Belgique : International society for horticultural science, p. 87-94. (Acta Horticulturae, n. 583). 26-29 Juillet 2001, Lima, Pérou.

Mazoyer M. et Roudart L. 1997. Histoire des agricultures du monde, du néolithique à la crise contemporaine. Edition du seuil. 533 p.

Mertz O. 2002. The relationship between length of fallow and crop yields in shifting cultivation: a rethinking. *Agroforestry Systems*, 55, 149-159p.

Mertz O., et al. 2012. Changes in shifting cultivation systems on small Pacific islands. *The Geographical Journal*, 178(2), 175-187. doi:10.1111/j.1475-4959.2011.00447.x

Mishra B.K. and Ramakrishnan P.S. 1981. The economic yield and energy efficiency of hill agro-ecosystems at higher elevations of Meghalaya in North-Eastern India. *Acta Oecologica*. 2: 369-389p.

Morelli C. 2003. Evaluation des performances agronomiques des jardins au Vanuatu: Estimation de leur durabilité agroécologique et proposition d'intensification par association aux cocoteraies. MSc thesis, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, 95 p.

Mpyisi E. Estimation of area, yield and production of root and tuber crops in Rwanda. In FAO statistics division and regional office for Africa. Proceedings of the expert consultation on root crop statistics Rome : FAO, 35p. (Vol. 1). Proceedings of the expert consultation on root crop statistics, Harare, Zimbabwe, 3-6 December 2002.

Montillet J. 1988. Essais plurilocaux "désherbage chimique" des cultures vivrières de riz pluvial; maïs, igname et manioc en zone forestière de Côte d'Ivoire. Mémoire. Montpellier : CNEARC, 88p.

Ngondé R. Root and tuber crop in DRC :Importance for food security and contribution to the improvement of statistics. In FAO statistics division and regional office for Africa. Proceedings of the expert consultation on root crop statistics Rome : FAO, 35p. (Vol. 1). Proceedings of the expert consultation on root crop statistics, Harare, Zimbabwe, 3-6 December 2002.

Nye P.H. and Greenland D.J. 1960. The Soil Under Shifting Cultivation. Technical Communication. Harpenden : Commonwealth Bureau of Soils, Agricultural Bureau.

O'Sullivan J., Asher C.J. and Blamey F.P.C. 1997. Nutrient Disorders of Sweet Potato. Canberra : ACIAR Monograph No. 48.

Palmans B., Van Houdt E. 1998. Effet des systèmes de culture sur la dégradation physique du sol et sur son évolution pédologique (Parana-Brésil). Montpellier : CNEARC et Gent : Rijksuniversiteit, 138p.

PNUD. 2012. Indicateurs internationaux de développement humain. [On-line][02/08/2012] <URL : <http://hdrstats.undp.org/fr/pays/profils/VUT.html>>

Quantin P. 1980. Nouvelles-Hébrides, Atlas des sols et de quelques 982 données du milieu naturel. ORSTOM, Paris, France.

Reboul C. 1989. Monsieur le capital et Madame la terre. Fertilité agronomique et fertilité économique. Paris : INRA, 253p.

- Rekha A., et al.** 2001. Etude de la diversité génétique et génomique chez le bananier (espèces et cultivars de *Musa*) à l'aide de l'analyse des distances D2 et de marqueurs RAPD. *Infomusa*, vol. 10, p29-34.
- Reenberg A. et al.** 2008. Adaptation of human coping strategies in a small island society in the SW Pacific – 50 years of change in the coupled human–environment system on Bellona, Solomon Islands. *Human Ecology*, 36 807-19p.
- Roose E.** 1993. Erosion, dégradation et restauration des sols tropicaux au Cameroun. Compte rendu de la sixième mission ROOOSE au Cameroun en appui au programme IRA du Nord Cameroun (Mbissiri) du 10 au 24 juin 1993 et au programme de coopération de l'ENGREF au centre universitaire de DSCHANG du 25-06 au 2-07-1993. Rapport de mission. Montpellier : CNEARC, 9p.
- Rousselet A.** 2002. Les systèmes agroforestiers, une alternative durable à la défriche-brûlis ? Essais d'introduction à Barra do Turvo, municipe de l'Etat de Sao Paulo soumis à une législation environnementale restrictive (Vale Do ribeira, Mata Atlantica, Brésil). Mémoire. Montpellier : CNEARC, 98p.
- Sauer C.** 1969. Vegeculture: an horticultural system based on vegetative reproduction of root and tuber crops. Berkeley: University of California Press, 435p.
- Szott L.T., Palm C.A.** 1996. Nutrient stocks in managed and natural humid tropical fallows. *Plant and Soil* 186: 293-309p.
- Seremele T.** 2001. Analyse des systèmes de culture racines et tubercules : pratiques et stratégies paysannes dans la conduite des cultures et la mise en marché des produits (Ile d'Efate-Vanuatu). Montpellier : CNEARC-EITARC, 122 p.
- Sillitoe P.** 1995. Fallow and fertility under subsistence cultivation in the Papua New Guinea Highlands: I. Fallow successions (Singapore). *Journal of Tropical Geography*. 16: 82-115p.
- Simeoni P.** 2009. Atlas du Vanouatou (Vanuatu). 1ed. Port-Vila : GeoConsulte, 392p.
- Siméoni, P., & Lebot, V.** 2012. Spatial Representation of Land Use and Population Density: Integrated Layers of Data Contribute to Environmental Planning in Vanuatu. *Human Ecology*. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s10745-012-9487-2>
- Somé A.N., Alexandre D.Y., Hien V.** 1999. Bio-indicateurs paysans de la fertilité des sols et gestion du cycle de culture-jachère en zone Soudanienne (Burkina Faso). *JABTA, Revue d'ethnologie*, 41(2), 137-145p.
- Soro et al.** 2003. Amélioration de la production de l'igname à travers la fertilisation minérale en zone de savane de Côte d'Ivoire. In Jamin J.Y., Seiny Boukar L., Floret C. 2003. Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque, mai 2002, Garoua, Cameroun.
- Saint Luce et al.** 2012. Near Infrared Reflectance Spectroscopy Prediction of Soil Nitrogen Supply in Humid Temperate Regions of Canada. *Soil science society of America*. doi:10.2136/sssaj2011.0443
- Tavares-Filho J., Tessier D.** 1998. Influence des pratiques culturales sur le comportement et les propriétés de sols du Parana (Brésil). *Etude et gestion des sols*, 5, 1, 61-71p.

Treche S. 1998. Valeur nutritionnelle des ignames. In Berthaud J., Bricas N., Marchand J.L. *L'igname, plante séculaire et culture d'avenir*. Montpellier, France : Cirad, 305-331. Actes du séminaire international, 3-6 juin 1997, Montpellier, France.

Tollens E. Report on the field experience "Estimation of area, yield and production of cassava in Bandundu (1987-1988) and Bas Congo (1988-1989) regions by an intensive yearlong weekly visit, production and marketing survey, on a large sample, as compared to the official RDC statistics". In FAO statistics division and regional office for Africa. Proceedings of the expert consultation on root crop statistics Rome : FAO, 35p. (Vol. 1). Proceedings of the expert consultation on root crop statistics, Harare, Zimbabwe, 3-6 December 2002.

Tortel V. 1998. Diagnostic des systèmes agraires de Fanafo, Santo, Vanuatu. Développement agricole. Paris : I.N.A.P.-G. Mémoire de D.E.S.S.

Unifa. 2007. Calculer les apports d'éléments nutritifs en pratique. [On- line] [10/09/2012] <URL: <http://www.andrevillemont.com/images/orki/File/doc32-fertimais.pdf>>

Vernier, P., Dossou R.A. 2000. Adaptation of yam (*Dioscorea* spp.) cultivation to changing environment and economic constraints in Benin, West Africa. In : proceeding of the ISTRC, 12th Symposium on Potential of Root Crops for Food and Industrial Resources, Tsukuba (Japan), September 10-16, 2000. p352-359.

Vernier P. et al. 2011. L'igname sur la côte est de Madagascar. *Atelier Agronomie et Ecosystème Corus Tana*. 13p.

Vanuatu national statistics Office (VNSO). 2007. 2007 Census of agriculture. Port-Vila, Vanuatu national statistics Office, 210p.

Vanuatu national statistics Office (VNSO). 2009. National census of population and housing. [On-line][16/09/2012] <URL: http://www.vnsso.gov.vu/images/stories/2009_Census_Summary_release_final.pdf>

Vanuatu national statistics Office (VNSO). 2012. Live population of Vanuatu. [On-line][21/09/2012] <URL : <http://www.vnsso.gov.vu/>>

Vergara N.T., Nair P.K.R. 1985. Agroforestry in the South Pacific region - an overview. *Agroforestry Systems*, 3 363–79

Walter A., Tzerikiantz F. 1999. La tarodièrre irriguée : un système d'agriculture diversifiée. *Journal d'agriculture tropicale et de botanique appliquée, Revue d'ethnologie*, vol. 41 (2) : 185-219.

Ward R.G. 1989. Earth's empty quarter? The Pacific Islands in a Pacific century. *The Geographical Journal* , 155 235–46.

Weightman B. 1989. Agriculture in Vanuatu. A historical review. Surrey : The British Friends of Vanuatu, 320p.

Annexes

Annexe 1 : Production moyenne par pied en fonction de l'espèce.....	61
Annexe 2 : Composition du sol au cours du cycle de culture.....	65
Annexe 3 :Teneur en macro-éléments des tubercules et des céréales	69
Annexe 4 : Exportations en minéraux des tubercules et des céréales.	70

Annexe 1 : Production moyenne par pied en fonction de l'espèce.

Ignames							
Espèces	Sources	Densité (pied/ha)	Rendements (t/ha)	Production d'un plant (kg/plant)	Min	Max	Moyenne
<i>Dioscorea</i>	Greindl, 2000 cité par Morelli 2003	4 000	25-37	6-9	1	15	5,6
	Vernier <i>et al.</i> , 2011	-	-	1,2			
	Vernier et Dossou, 2000	-	30	-			
	Memento, 2002	10 000	-	1			
		4 000	-	5			
	Pesées 2012	-	-	1,2			
	Tortel, 1998	15 000	8-10	2-15			
<i>Dioscorea alata</i>	Akoroda, 1995 cité par Lebot, 2009	10 000	18,1-42,1	1,8-4,3	1,8	5	3,6
	Plante alimentaire du Pacifique sud 1980 cité par Morelli, 2003	10 000	25-50	2,5-5			
	Station CTRAV, 2012			2,5			
	Allen, 2001		12	5,2			
<i>Dioscorea esculenta</i>	Allen, 2001		2,1-2,8	7	7	7	7
<i>Dioscorea cayennensis</i>	-	-	-	-	1*	15*	5,6*
<i>Dioscorea nummularia</i>	Allen, 2001	-	-	9,8	9,8	9,8	9,8
	Lebot, 2009	-	-	15-50	5	10	7,5
<i>Dioscorea transversa</i>	-	-	-	-	1*	15*	5,6*
<i>Dioscorea rotundata</i>	Allen, 2001	-	1,8-4,5	8,9	0,4	4,1	4,5
	Akoroda, 1995 cité par Lebot, 2009	-	6,7-31-9	0,4-4,1			
<i>Diocorea pentaphylla</i>	Lebot, 2009	-	-	5-10	5	10	7,5

*N'ayant pas de références bibliographiques concernant ces espèces, la moyenne du genre *Dioscorea* leur a été attribuée.

Taro							
Sources	Densité (pied/ha)	Rendements (t/ha)	Rendements au Vanuatu (t/ha)	Production d'un plant (kg/plant)	min	max	moyenne
Memento, 2002		20		0,25-4	0,3	6,0	2,6
FAO, 2007 cité par Lebot, 2009		6,7					
Lebot, 2009	10 000-20 000	37		1,85-3,7			
Spriggs, 1981 cité par Morelli, 2003		60-110					
Seremele, 2001			8-12				
Tortel, 1998	9100		17	1,9			
		8					
Greindl, 2000 cité par Morelli, 2003	3 000-12 000	14-26		1,16-8,67			
Bourrieau, 2000			8-12 (en sec)				
			15-20 (irrigué)				
Station CTRAV, 2012				0,9			
Pesées 2012				1,1			

Taro fidji							
Sources	Densité (pied/ha)	Rendements (t/ha)	Rendements au Vanuatu (t/ha)	Production d'un plant (kg/plant)	Min	Max	Moyenne
Lebot, 2009	10 000-20 000			3-5	2	6,6	3,6
Morelli, 2003	6 500			2			
FAO, 2007 cité par Lebot, 2009		6,7					
Memento, 2002		20					
Seremele, 2001			9-15				
Tortel, 1998	5 000	20		4			
Greindl, 2000 cité par Morelli, 2003	3 000-10 000	20		2-6,6			
Station CTRAV, 2012				2			
Allen, 2001				2,5-5,1			

Bananes							
Sources	Densité (pied/ha)	Rendements (t/ha)	Rendements au Vanuatu (t/ha)	Poids d'un régime (kg/plant)	Min	Max	Moyenne
Morelli, 2003	7 500			10	6,2	10	9,3
Mémento, 2002		40					
Greindl, 2000 cité par Morelli, 2003	3 000-8 000	8-16					
Rekha <i>et al.</i> , 2001				8,3			
Allen, 2001			6,2	9,5			

Manioc								
Sources	Densité (pied/ha)	Rendements	Rendements potentiels	Rendements au Vanuatu	Production d'un plant (kg/plant)	Min	Max	Moyenne
Lebot, 2009	10 000	15	90		1,50*	1,5	6	4,4
Morelli, 2003	6 500				5			
Mémento, 2002	quelques milliers à 12 000	50	90		4,17*			
Seremele, 2001				10-20				
Cnuced, 2012					5-6			
FAO, 2007 cité par Lebot, 2009		12,2	90					
Plantes alimentaires du Pacifique sud, 1980 cité par Morelli, 2003		3-9						
Station CTRAV					4,8			

*Ces productions sont obtenues en divisant les rendements par le nombre de pied à l'hectare.

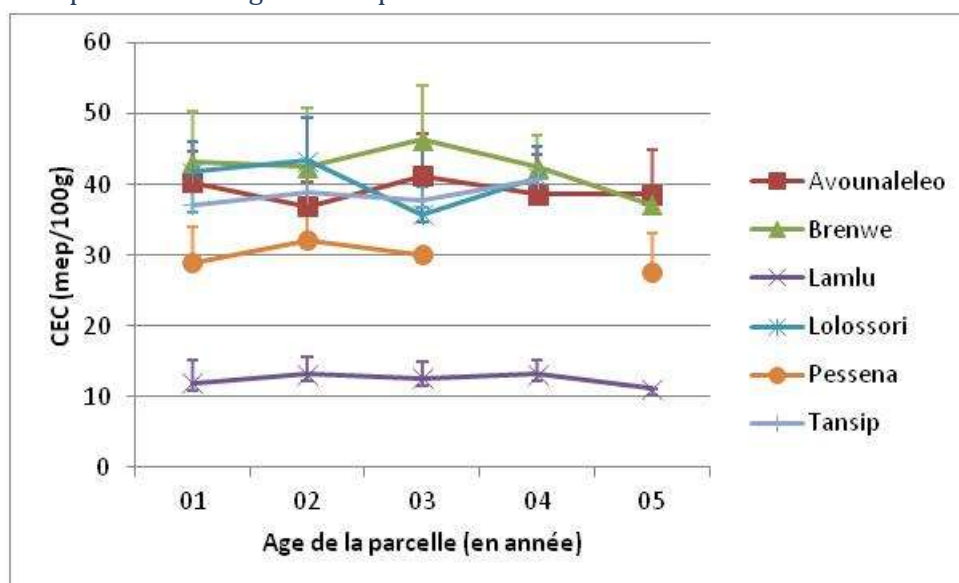
Ipomea batatas							
Sources	Densité (pied/ha)	Rendements (t/ha)	Rendements au Vanuatu (t/ha)	Production d'un plant (kg/plant)	min	max	moyenne
Lebot, 2009	10 000-40 000				0,7	4,8	2,4
Memento, 2002	30 000-60 000	40-88		0,67-2,93			
Seremele, 2001			8-12				
O'Sullivan <i>et al.</i> , 1997			12				
Plante alimentaire du Pacifique sud 1980, cité par Morelli, 2003		8-16					
Greindl, 2000, cité par Morelli, 2003	8 000	14-38		1,75-4,75			
FAO, 2007, cité par Lebot, 2009		13,7					
Tortel, 1998	3870		4	2			
Pesées 2012				2,1			

	Min	Max	Moyenne	Moyenne pondérée	année 1	Années 2/3/4/5
<i>Manihot esculenta</i>	1,5	6	4,4	4,4	4,4	4,4
<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	2	6,6	3,6	3,6	5,1	2,5
<i>Ipomoea batatas</i>	0,6	4,7	2,3	2,3	2,3	2,3
<i>Musa spp.</i>	6,2	10	9,3	12,4*	0	12,4
<i>Dioscorea esculenta</i>	1	15	7	7	7	7
<i>Dioscorea alata</i>	1,8	5	3,2	3,2	3,2	3,2
<i>Dioscorea transversa</i>	1	15	9,8	9,8	9,8	9,8
<i>Dioscorea cayennensis</i>	1	15	5,6	5,6	5,6	5,6
<i>Dioscorea nummularia</i>	5	10	7,5	7,5	7,5	7,5
<i>Colocasia esculenta</i>	0,3	8,7	2,6	2,6	2,6	2,6

*Le bananier à un cycle de 9 mois. C'est une plante pérenne, nous avons donc ramener sa production à l'année car elle produit en continu.

Annexe 2 : Composition du sol au cours du cycle de culture.

La capacité d'échange cationique

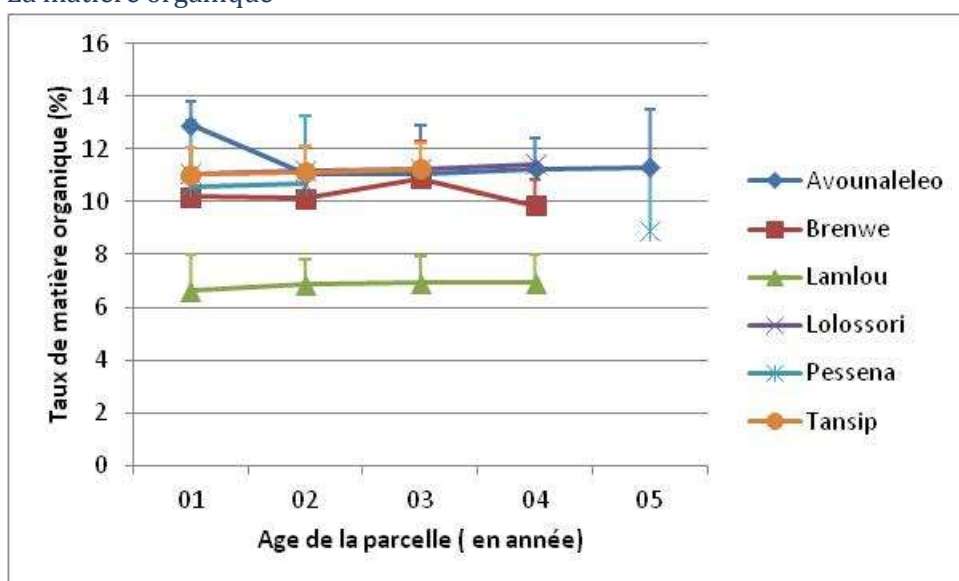


p-value 0,103

Alpha 0,05

D'après le test de Kruskal-Wallis, l'évolution de la capacité d'échange cationique au cours du temps n'est pas significative, car la valeur du p-value est supérieur au seuil α .

La matière organique

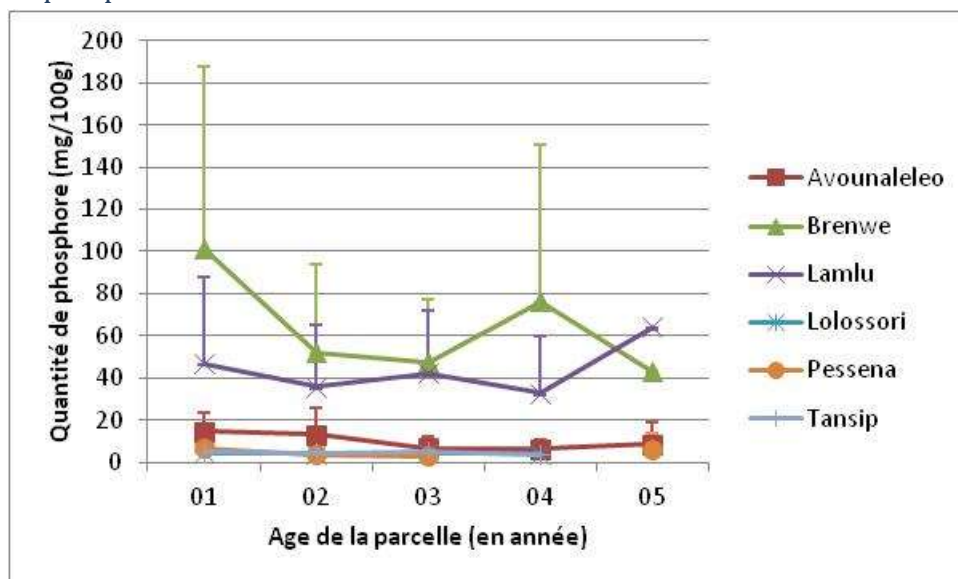


p-value 0,989

Alpha 0,05

D'après le test de Kruskal-Wallis, l'évolution de la matière organique au cours du temps n'est pas significative, car la valeur du p-value est supérieur au seuil α .

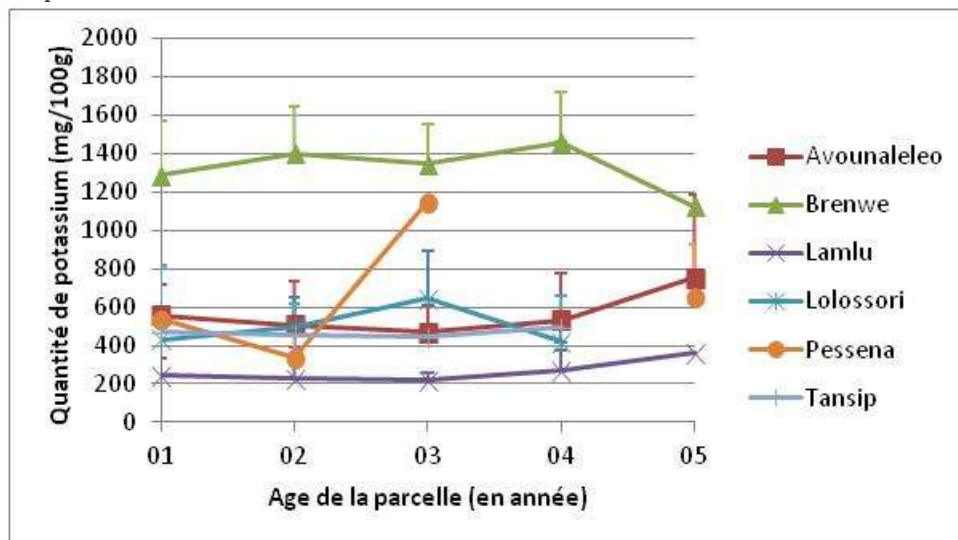
Le phosphore



p-value	0,091
Alpha	0,05

D'après le test de Kruskal-Wallis, l'évolution du phosphore au cours du temps n'est pas significative, car la valeur du p-value est supérieure au seuil α .

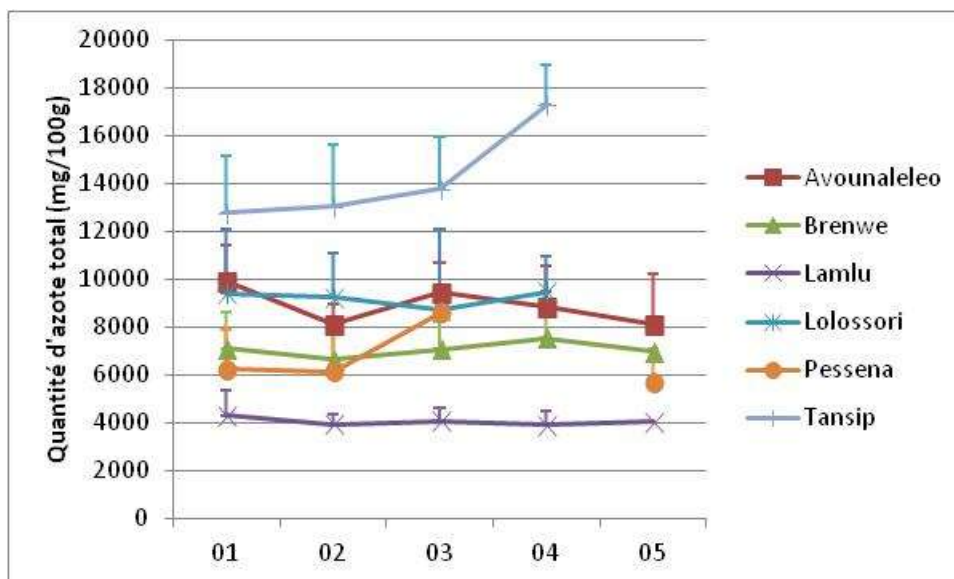
Le potassium



p-value	0,131
Alpha	0,05

D'après le test de Kruskal-Wallis, l'évolution du potassium au cours du temps n'est pas significative, car la valeur du p-value est supérieure au seuil α .

L'azote total

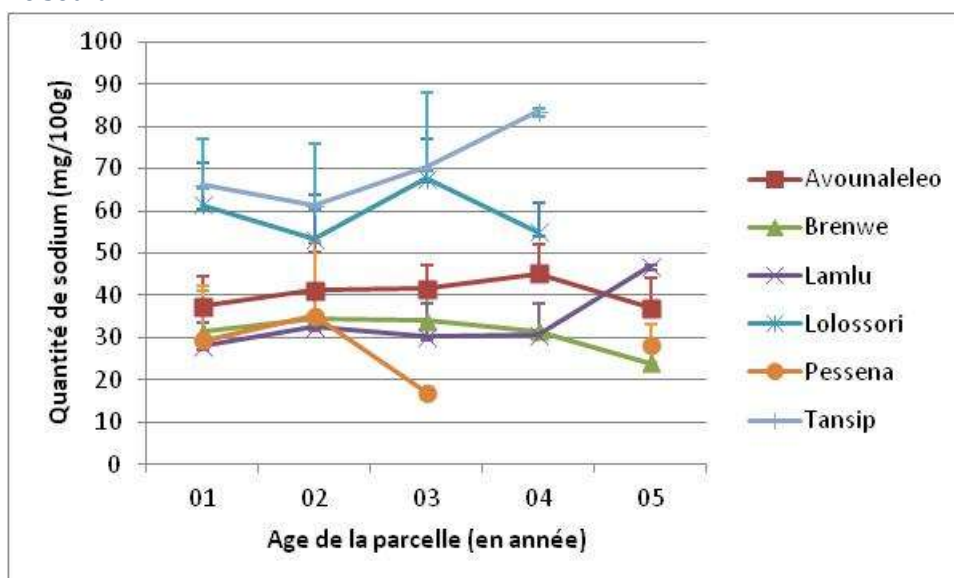


p-value 0,778

Alpha 0,05

D'après le test de Kruskal-Wallis, l'évolution de l'azote au cours du temps n'est pas significative, car la valeur du p-value est supérieur au seuil α .

Le sodium

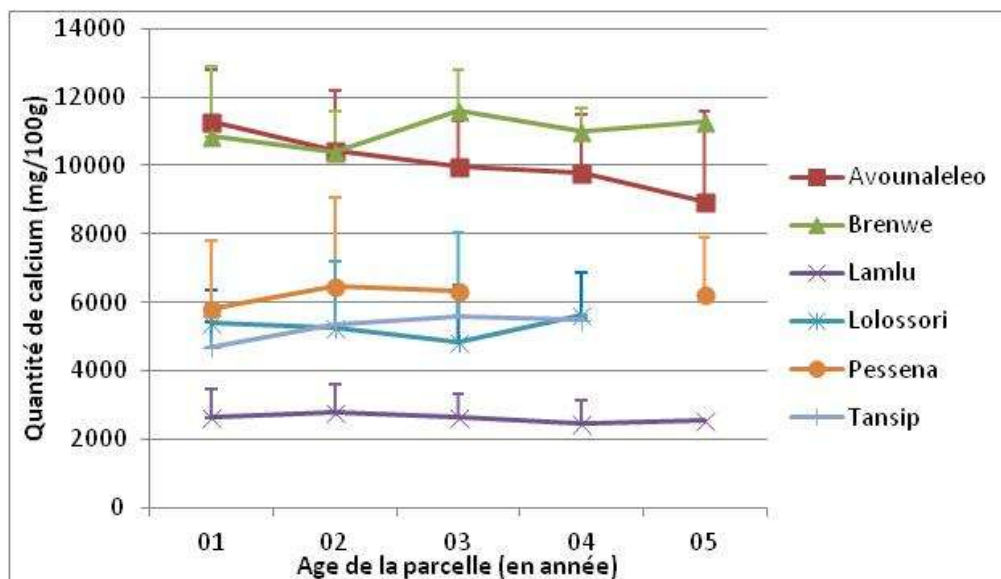


p-value 0,187

Alpha 0,05

D'après le test de Kruskal-Wallis, l'évolution du sodium au cours du temps n'est pas significative, car la valeur du p-value est supérieur au seuil α .

Le calcium

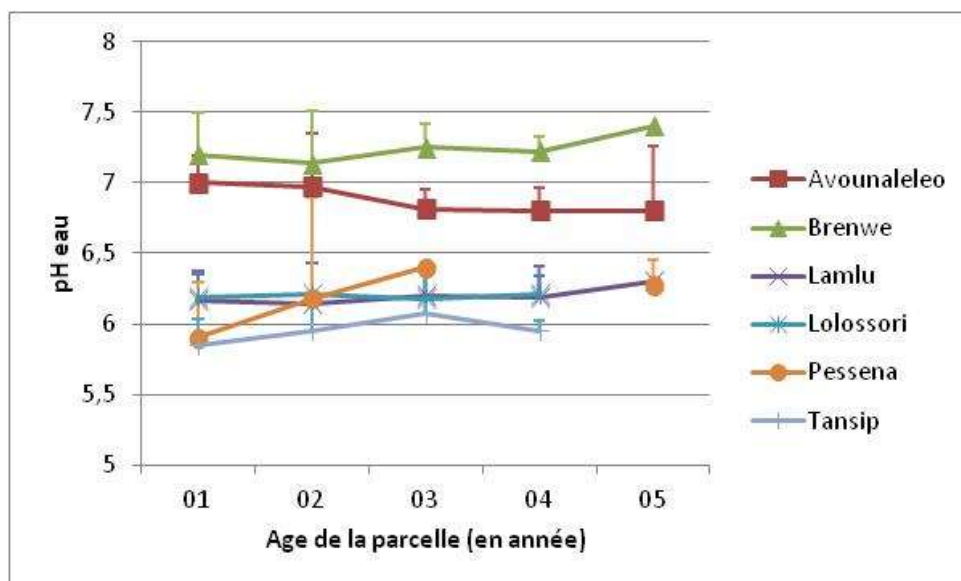


p-value 0,050

Alpha 0,05

D'après le test de Kruskal-Wallis, l'évolution du calcium au cours du temps n'est pas significative, car la valeur du p-value est supérieur au seuil α .

Le pH-eau



p-value 0,000

Alpha 0,05

D'après le test de Kruskal-Wallis, l'évolution du pH au cours du temps est significative, car la valeur du p-value est inférieur au seuil α .

Annexe 3 : Teneur en macro-éléments des tubercules et des céréales

	Sources	Matière sèche (% de matière fraîche)	Amidon (% de matière sèche)	Sucres totaux (% de matière sèche)	Cellulose (% de matière sèche)	Protéines (% de matière sèche)	Minéraux (% de matière sèche)
Manioc	Bradbury and Holloway, 1988	37	83,8	2,25	4	1,35	
	Howeler, 2002	38					
	FAO, 2007 (cité par Lebot, 2009)	35	91,25	3,96	2,915	3,335	2,71
	Végé-Culture, 2012		85,29	4,12	3,01	2,30	2,51
Igname	Végé-Culture, 2012		77,22	2,65	4,59	9,85	4,59
Patate douce	Howeler, 2002	20					
	Bradbury and Holloway, 1988	28,9	69,6	8,24	5,67	4,95	
	FAO, 2007 (cité par Lebot, 2009)	27,5	85	10,9	3,95	6,8	3,95
	Végé-Culture, 2012		68,79	10,94	4,97	5,72	3,51
Taro	Memento, 2002	37,5					
	FAO, 2007 (cité par Lebot, 2009)	25	79,15	10	6,25	8,75	3,75
	Bradbury and Holloway, 1988	31			4,83	3,55	
	Lebot <i>et al.</i> , 2004	27,9	65,5	12,9		6,5	3,4
	Végé-Culture, 2012		78,48	4,15	3,06	4,62	4,18
Taro fidji	Memento, 2002	37,5					
	FAO, 2007 (cité par Lebot, 2009)	25	79,15	10	6,25	8,75	3,75
	Végé-Culture, 2012		82,19	0,69	2,70	5,79	3,65
Banane	Aprifel, 2012		-	-	8	4,8	
	Afssa, 2012	25,3	-		11,8	4,7	1,8
Blé (Farine T80)	Afssa, 2012	86,50	73,99	2,05	0,5	5,32	13,18
Riz (Blanchi)	Afssa, 2012	87,70	70,7	0,75	0,68	4,1	7,81

Annexe 4 : Exportations en minéraux des tubercules et des céréales, en kg par tonne.

	Espèces	Sources	Azote total	Phosphore	Potassium	Calcium	Magnésium
Taro		Blamey, 1996	1,75-4,25	0,5-1,4	3,13-5,25	0,13-0,375	0,2-1,15
Ilgname	Dioscorea alata	Bradbury and Holloway, 1988		0,38	3,18	0,08	0,17
	Dioscorea esculenta			0,39	3,03	0,08	0,26
	Dioscorea bulbifera			0,4	4,48	0,07	0,3
	Dioscorea nummularia			0,27	3,46	0,08	0,19
	Dioscorea pentaphylla			0,26	3,74	0,13	0,23
	Dioscorea trifida			0,38	3,5	0,08	0,15
	Dioscorea rotundata			0,28	3,61	0,05	0,17
		Soro <i>et al.</i> , 2000	3,8	0,39	4,2		
		Memento, 2002	4	0,4	4,4	0,1	0,2
Manioc		Bradbury and Holloway, 1988		0,46	3,2	0,2	0,3
		Howeler, 2002	1,71	0,32	2,51	.	.
		Lebot, 2009	2,33	0,39	3,07	0,27	
Patate douce		Howeler, 2002	2,4	0,53	3,84		
		O'Sullivan, 1997	2,17	0,5	5	0,3	0,25
		Bradbury and Holloway, 1988		0,51	2,6	0,29	0,26
Banane		Afssa, 2012	12	0,175	4,11	0,0447	0,32
		Aprifel, 2012		0,22		0,08	0,3
	Cavendish	Memento, 2002		0,32	4,01	0,12	
	Plantain	Memento, 2002		0,38	3,52	0,19	
Riz	-	Memento, 2002	16-24	3 à 7	30 à 55	2 à 5	2 à 5
Maïs	-	Chambre d'agriculture du Tarn, 2010	15	7	5		
Maïs	-	Unifa, 2007	21	7	5		1,5
Blé	-	Chambre d'agriculture du Tarn, 2010	19	9	7		